

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Josipa Delaš**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Stanko Škec, mag. ing.

Student:

Josipa Delaš

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru, doc.dr.sc. Stanku Škecu na ukazanoj pomoći, pruženim savjetima i pristupačnosti tokom izrade ovog rada.

Josipa Delaš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josipa Delaš**

Mat. br.: **0035199554**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA AKSIOMATSKIH PRINCIPA ZA EVALUACIJU PROIZVODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF AXIOMATIC PRINCIPLES FOR PRODUCT EVALUATION**

Opis zadatka:

Aksiomatsko konstruiranje je metoda koja omogućuje sustavni pristup formalizaciji problema konstruiranja i konceptualizaciji mogućih rješenja. Aksiomatski principi konstruiranja uobičajeno se koriste za konstruiranje novih proizvoda, analize postojećih konstrukcijskih rješenja te unaprjeđenje postojećih proizvoda. Cilj ovog završnog rada je osmišljavanje i provođenje evaluacije proizvoda temeljeno na primjeni aksiomatskih principa.

U radu je potrebno:

- Proučiti i usporediti postojeće pristupe za evaluaciju proizvoda.
- Proučiti aksiomatske principa konstruiranja.
- Definirati proceduru za evaluaciju proizvoda primjenom aksiomatskih principa.
- Provesti evaluaciju proizvoda izrađenih u okviru EGPR (*eng. European Global Product Realisation*) kolegija.
- Predložiti moguće konstrukcijske promjene koristeći principe aksiomatskog konstruiranja.

Opseg analize i interpretacije rezultata dogovoriti će se tijekom izrade rada.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

**1. rok:** 23. veljače 2018.

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2018.

**3. rok:** 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 26.2. - 2.3. 2018.

**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2018.

**3. rok:** 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Stanko Škec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1 UVOD.....	1
1.1 Evaluacija koncepata.....	1
1.2 Metode odlučivanja.....	3
2 OSNOVNI PRICIPI AKSIOMATSKOG KONSTRUIRANJA .....	5
2.1 Aksiom nezavisnosti .....	9
2.2 Informacijski aksiom.....	13
2.3 Istaknuti teoremi i korolari.....	16
2.4 Primjena Aksiomatskog konstruiranja u evaluaciji koncepata .....	16
2.5 Najčešće pogreške koje se javljaju prilikom primjene Aksiomatskog konstruiranja .....	20
3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	22
3.1 Definiranje zahtjeva .....	22
3.2 Generiranje inicijalnih matrica.....	23
3.3 Evaluacija koncepata prema dobivenim matricama konstruiranja .....	23
4 PRIMJENA PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA PRIMJERU KONCEPATA RAZVIJENIH TIJEKOM EGPR KOLEGIJA .....	26
4.1 Definiranje zahtjeva .....	26
4.2 Generiranje inicijalnih matrica.....	27
4.2.1 Opis koncepta 1 i pojašnjenje DM.....	34
4.2.2 Opis koncepta 2 i pojašnjenje DM.....	36
4.2.3 Opis koncepta 3 i pojašnjenje DM.....	38
4.2.4 Opis koncepta 4 i pojašnjenje DM.....	40
4.3 Evaluacija koncepata prema dobivenim matricama konstruiranja .....	42
5 DISKUSIJA .....	47
6 PRIJEDLOG POBOLJŠANJA.....	49
7 ZAKLJUČAK.....	51

LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	54

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz koraka u fazi koncipiranja [3] .....	1
Slika 2.	Tok donošenja odluke [5].....	2
Slika 3.	Prikaz povezanosti četiri domene s odgovarajućom hijerarhijom.....	6
Slika 4.	Shematski pregled pojedinih rješenja analogno njihovoj uparenosti .....	12
Slika 5.	Entropija (količina informacija) kao funkcija vjerojatnosti .....	14
Slika 6.	Definicija vjerojatnosti uspjeha.....	15
Slika 7.	Dijagram toka za evaluaciju pomoću Aksiomatskog konstruiranja [18] .....	19
Slika 8.	Dijagram toka predložene metodologije istraživanja.....	22
Slika 9.	Modificiran dijagram toka za evaluaciju pomoću Aksiomatskog konstruiranja...	24
Slika 10.	Skuter prema konceptu 1 .....	34
Slika 11.	Konačna matrica konstruiranja koncepta 1 .....	35
Slika 12.	Skuter prema konceptu 2 .....	36
Slika 13.	Konačna matrica konstruiranja koncepta 2 .....	37
Slika 14.	Skuter prema konceptu 3 .....	38
Slika 15.	Konačna matrica konstruiranja koncepta 3 .....	39
Slika 16.	Skuter prema konceptu 4 .....	40
Slika 17.	Konačna matrica konstruiranja koncepta 4 .....	41

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba različitih metoda odlučivanja .....	3
Tablica 2. Dekompozicija najviše razine hijerarhije .....	28
Tablica 3. Dekompozicija FR <sub>1</sub> Osigurati nosivost .....	29
Tablica 4. Dekompozicija FR <sub>14</sub> Osigurati korisnika od ispadanja .....	30
Tablica 5. Dekompozicija FR <sub>2</sub> Omogućiti međusobno pomicanje dijelova .....	30
Tablica 6. Dekompozicija FR <sub>21</sub> Omogućiti sklapanje .....	31
Tablica 7. Dekompozicija FR <sub>23</sub> Prilagoditi prijevozno sredstvo korisniku.....	32
Tablica 8. Dekompozicija FR <sub>3</sub> Osigurati protok energije za pokretanje.....	32
Tablica 9. Dekompozicija FR <sub>31</sub> Pogoniti prijevozno sredstvo .....	33
Tablica 10. Dekompozicija FR <sub>4</sub> Omogućiti upravljanje .....	33
Tablica 11. Tablični prikaz neispunjenosti funkcijskih zahtjeva pojedinih koncepata .....	42
Tablica 12. Broj zajedničkih elemenata između pojedinih koncepata .....	43
Tablica 13. Usporedba koncepata.....	45
Tablica 14. Evaluacija koncepata prema informacijskom aksiomu .....	46



## POPIS KRATICA

Kratika	Opis
CA	Korisnički atributi ( <i>costumer attributes</i> )
CN	Potrebe korisnika ( <i>costumer needs</i> )
CR	Zajednički raspon ( <i>common range</i> )
DM	Matrica konstruiranja ( <i>design matrix</i> )
DP	Konstrukcijski parametar ( <i>design parameters</i> )
DR	Konstrukcijski raspon ( <i>design range</i> )
EGPR	European Global Product Realization
FM	Funkcijska metrika ( <i>functional metrics</i> )
FR	Funkcijski zahtjev ( <i>functional requirements</i> )
MECE	Uzajamno isključujući kolektivno sveobuhvatan ( <i>mutually exclusive collectively exhaustive</i> )
nFR	Ne-funkcijski zahtjev ( <i>non-functional requirements</i> )
OC	Kriterij optimizacije ( <i>optimization criteria</i> )
PDF	Funkcija gustoće vjerojatnosti ( <i>probability density function</i> )
PV	Procesna varijabla ( <i>process variable</i> )
R	Reangularnost ( <i>reangularity</i> )
S	Semangularnost ( <i>semangularity</i> )
SC	Kriteriji odabira ( <i>selection criteria</i> )
SR	Raspon sustava ( <i>system range</i> )

## SAŽETAK

### Tekst sažetka

Koncepti predstavljaju moguća rješenja zadanog problema, a generiraju se nakon što su definirani ciljevi, odnosno u jednoj od ranijih faza razvoja proizvoda. Budući da je tako rano potrebno odabrati jedan koncept iz kojega će se nastaviti razvijati proizvod postoji mnogo metoda evaluacije koje pomažu prilikom donošenja te odluke. U ovom radu korištena je metoda pod nazivom Aksiomatsko konstruiranje koja se temelji na tvrdnji da dobra konstrukcija zadovoljava aksiom nezavisnosti i informacijski aksiom. Na temelju postojeće literature predložena je metodologija za istraživanje u okviru kojeg je izvršena evaluacija koncepata skutera za mobilnost koji su razvijeni tokom EGPR kolegija u suradnji sa industrijskim partnerom. Skuteri za mobilnost su električno pogonjena vozila konstruirana za ljude s ograničenom pokretljivošću. Tokom istraživanja ustanovljeno je da je za pravilnu primjenu principa Aksiomatskog konstruiranja važno pravilno definirati funkcijske zahtjeve, odnosno pravilno provesti dekompoziciju. Funkcijski zahtjevi dobiveni su direktno iz potreba korisnika koje su postavljene uz pomoć podataka prikupljenih na početku kolegija u okviru analize tržište. Na temelju postavljenih zahtjeva proveden je proces povezivanja pomoću kojeg su dobiveni konstrukcijski parametri a zatim i matrice konstruiranja. Evaluacija je izvršena ovisno o tome ispunjava li koncept navedene funkcijske zahtjeve, analizom sparenosti matrica konstruiranja prema aksiomu nezavisnosti i analizom količine informacija prema informacijskom aksiomu. Na kraju je izvršena usporedba dobivenih rezultata sa metodama evaluacije pronađenim u literaturi, odabran je najbolji koncept i predložena su poboljšanja prema već navedenim kriterijima.

Ključne riječi: Aksiomatsko konstruiranje, evaluacija koncepata, skuter za mobilnost, funkcijski zahtjevi.

## **SUMMARY**

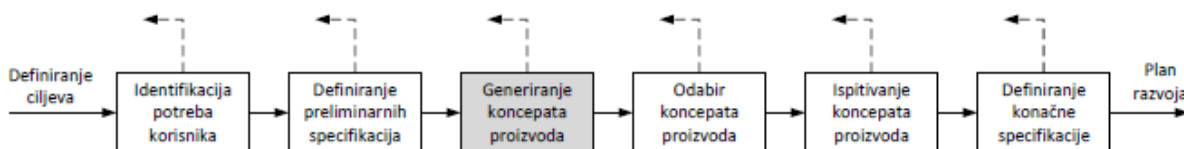
### **Abstract**

Concepts represent viable solutions for solving the specified problem and are generated after target specifications are defined in one of the earliest phases of product development. Since it is necessary to choose a single concept from which product will continue to develop, there are many evaluation methods to help make this decision. In this paper, Axiomatic Design method, which is based on a claim that good design satisfies Independence and Information Axiom, is used. Based on existing literature case methodology was proposed within which mobility scooter concepts, developed during the EGPR course in cooperation with an industrial partner, were evaluated. Mobility scooters are electrically powered vehicles designed for people with limited mobility. During research it was established that, for correct application of Axiomatic Design principles, correct decomposition and formulation of functional requirements was necessary. Functional requirements were defined directly from customer needs which were formulated with data gathered at the beginning of the course within the market analysis. Based on set requirements, mapping process was conducted by which design parameters and design matrices were gained. Evaluation was conducted based on whether concepts fulfill functional requirements, coupling analysis according to Independence Axiom and analysis of content information according to Information Axiom. Lastly, a comparison between obtained results and other methods found in literature was made, best concept was selected, and improvements were suggested according to specified criteria.

**Key words:** Axiomatic design, concept evaluation, mobility scooter, functional requirements.

# 1 UVOD

Razvoj proizvoda započinje fazom planiranja čiji su rezultat definirani ciljevi razvoja. Nakon nje slijedi faza koncipiranja u kojoj se prepoznaju potrebe korisnika, izdvajaju problemi, uspostavljaju funkcijske strukture i traže prikladni principi rada kako bi se njihovom kombinacijom pronašla moguća rješenja problema [1]. Rezultat faze koncipiranja su specifikacije načelnog rješenja (koncepta). Koncept je aproksimativni opis principa rada proizvoda, tehnologije i oblika proizvoda [2]. On se najčešće prikazuje pomoću skice ili grubog 3D modela i kratkog tekstualnog opisa. Proces generiranja koncepta počinje nakon definiranja preliminarnih specifikacija iz potreba korisnika, a rezultira konceptima koje je potrebno vrednovati kako bi tim mogao donijeti konačan odabir.

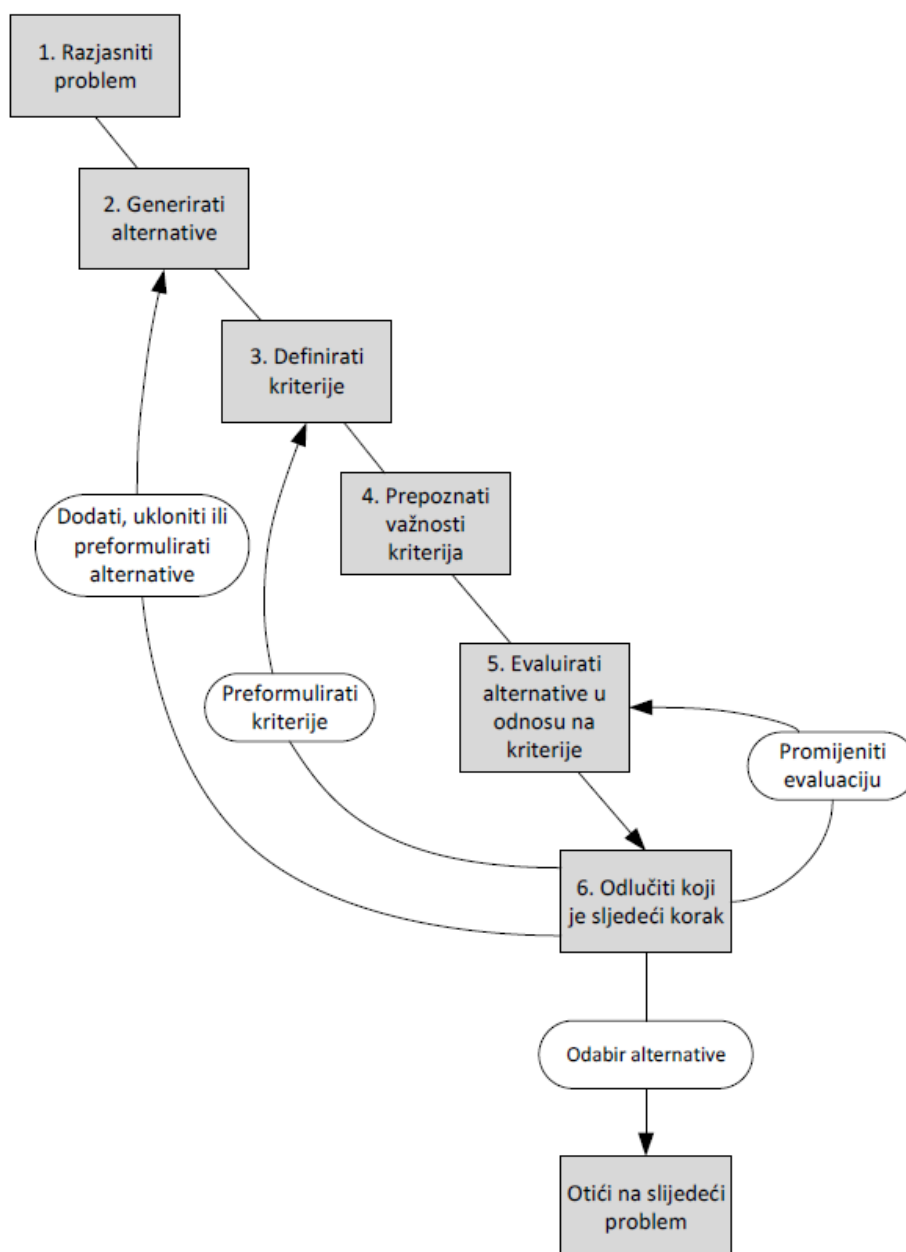


Slika 1. Prikaz koraka u fazi koncipiranja [3]

## 1.1 Evaluacija koncepta

Evaluacija služi kako bi se odredila valjanost, vrijednost i korisnost rješenja s obzirom na ciljeve koje smo postavili za proizvod koji razvijamo [1]. Neophodno je postaviti cilj budući da vrijednost rješenja nije apsolutna nego se mora mjeriti u odnosu na određene zahtjeve. Evaluacija koncepta radi se nakon što su koncepti generirani, odnosno predstavlja alat za donošenje odluke o odabiru koncepta. U nju mogu biti uključene procjene tehničkih, sigurnosnih, ekoloških i ekonomskih vrijednosti. Prvi korak u evaluaciji je postavljanje skupa ciljeva kako bi se iz njih mogli odrediti evaluacijski kriteriji. Ciljevi se postavljaju prema listi zahtjeva i općim ograničenjima koji se prepoznaju tokom rada na rješavanju problema. Razlikuju se po važnosti, a potrebno ih je odrediti tako da pokrivaju sve zahtjeve važne za odluku. Pritom je namjera održati njihovu međusobnu nezavisnost. Ako se to ne postigne kriteriji postaju konfliktni budući da se dobivaju direktno iz ciljeva. Takve kriterije mogu predstavljati na primjer, cijena i kvaliteta sustava, jer pozitivan utjecaj na jedan kriterij uzrokuje negativan utjecaj na drugi. Osim konfliktnih kriterija u ovako ranoj fazi razvoja proizvoda javlja se i problem nepreciznih informacija. Naime, budući da većina karakteristika još nije definirana, imamo malo informacija o sustavu pa se neke od njih pretpostavljaju (na primjer

masa i gabaritne dimenzije). Nepouzdanost takvih informacija neke od metoda evaluacije ne uzimaju u obzir, što loše utječe na kvalitetu donošenja odluke. Konfliktni kriterij i neprecizne informacija predstavljaju nesigurnosti tokom procesa odlučivanja[4].



**Slika 2. Tok donošenja odluke [5]**

Tek kada smo postavili kriterije možemo na temelju njih uspoređivati pojedine koncepte i prepoznavati njihove relativne prednosti i nedostatke. U nekim se metodama prije uspoređivanja koncepata kriterijima dodjeljuju težinski faktori. Težinski faktori definiraju međusobnu relativnu važnost kriterija. Oni se dodjeljuju subjektivno, pa su pokazatelj koji su kriteriji konstruktoru najbitniji, ali isto tako njihova primjena ukazuje na to koja alternativa

najbolje zadovoljava istaknute kriterije. Proces odabira koncepta je konvergirajući, odnosno broj koncepata koje uzimamo u obzir postupno se smanjuje. Koncepti se često naknadno kombiniraju i popravljaju kako bi se uklonilo što više njihovih nedostataka [2]. Takvi postupci čine proces iterativnim [Slika 2]. Kvaliteta odabranog koncepta ima velik utjecaj na to koliko konačan proizvod zadovoljava potrebe korisnika i na uspješnost prodaje istog. Dobar koncept je ponekad loše izveden u kasnijim fazama razvoja, ali lošim konceptom se gotovo nikad ne postiže komercijalni uspjeh [2]. Zbog takvog utjecaja na faze koje ju slijede, smatra se da je evaluacija koncepata jedna od najvažnijih faza u procesu razvoja [4]. Izbor koncepta utječe na robusnost, proizvodljivost i vrijeme potrebno za provedbu kasnijih faza razvoja proizvoda.

## 1.2 Metode odlučivanja

Kako bi se konstruktorima pomoglo donijeti ispravne odluke prilikom izbora koncepta, postoje mnoge metode odlučivanja. Neke od njih su inicijalno razvijene za druge svrhe, ali se primjenjuju u području konstruiranja i razvoja proizvoda. Metoda se odabire ovisno o karakteristikama problema odlučivanja (jedan ili više kriterija, razina nesigurnosti, područje, namjena, itd.)([6].

**Tablica 1. Usporedba različitih metoda odlučivanja**

Naziv metode	Opis	Prednosti	Nedostaci	Primjena
Vrednovanje metodom težinskih faktora	Svakom kriteriju se dodjeljuje težinski faktor. On se množi sa ocjenom alternative za taj kriterij. Alternative se rangiraju prema sumi svih kriterija.	Jednostavna za korištenje.	Ne uzima u obzir nesigurnost podataka.	[7]
Pugh-ova metoda	Odabire se jedna alternativa kao referentna, te se ostali koncepti evaluiraju u odnosu na nju	Jednostavna i brza za korištenje.	Svi kriteriji su jednako važni. Ne uzima u obzir nesigurnost podataka.	[8]

Analitički hijerarhijski proces (AHP)	Alternative se rangiraju prema kvantitativnim i kvalitativnim podacima. Usporedbe se vrše između svih alternativa odvojeno za svaki kriterij kojemu je dodijeljen težinski faktor.	Prikladna za donošenja odluka koje imaju i kvalitativne i kvantitativne kriterije.	Ne uzima u obzir nesigurnost podataka. S povećanjem broja kriterija i alternativa raste kompleksnost računa.	[9]
Kuća kvalitete (QFD)	Zabilježene potrebe korisnika se prebacuju u tehničke specifikacije. Kriterijima su dodijeljeni težinski faktori.	Uzima u obzir utjecaj jedne odluke na drugu.	Ne uzima u obzir nesigurnost podataka. Nije moguće provesti evaluaciju ako se ne utvrdi numerička povezanost odluka [10].	[11]
Aksiomatsko konstruiranje	Alternative se uspoređuju na temelju informacijskog aksioma prilikom čega se uzima u obzir povezanost kriterija.	Uzima u obzir utjecaj jedne odluke na drugu. Uzima u obzir nesigurnost podataka	Kompleksno je utvrditi numeričku povezanost odluka.	[12]

Donošenje odluke je kompleksan proces u kojem je potrebno uzeti u obzir mnogo različitih aspekata i međusobno ih usporediti [13]. Osim objektivnih aspekata, koje je moguće opisati ili mjeriti, odluke također ovise i o subjektivnim aspektima kao što su strah od rizika i preference osobe koja donosi odluku. Iz ovoga se može zaključiti da ne postoji jedna najbolja odluka, te je potrebno pažljivo odabrati metodu koja će se implementirati. U ovom će se radu koristiti principi aksiomatskog konstruiranja za evaluaciju koncepata čiji su prototipi već prethodno napravljeni, kako bi se rezultati metode mogli usporediti s valjanošću gotovih proizvoda.

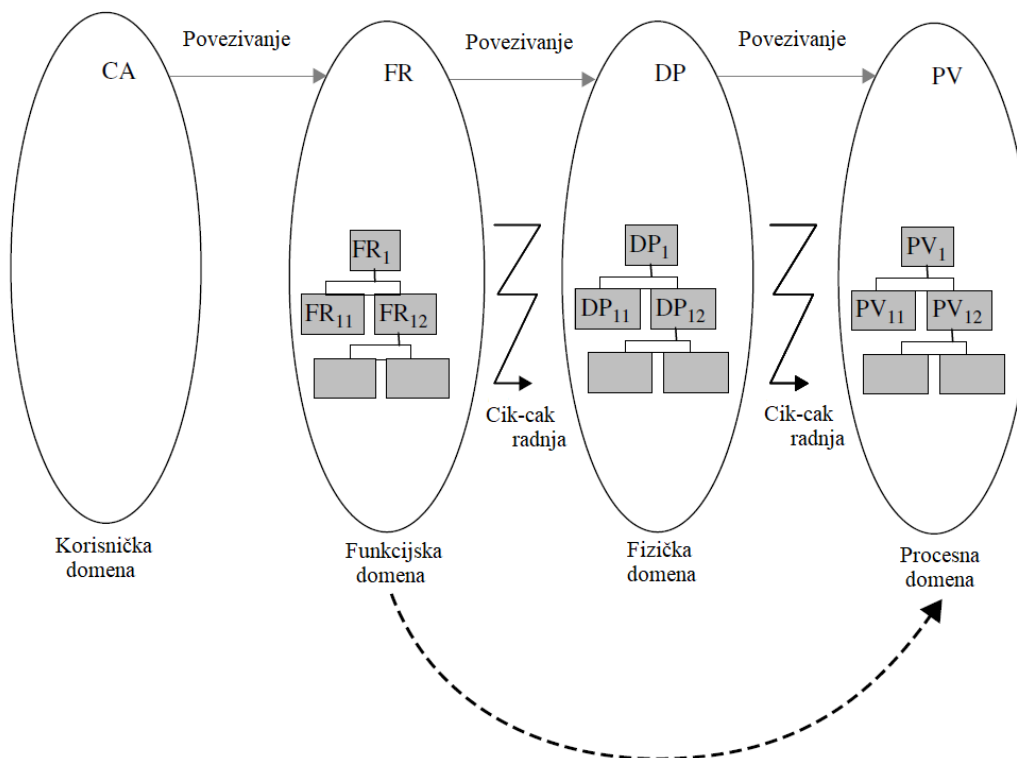
## 2 OSNOVNI PRICIPI AKSIOMATSKOG KONSTRUIRANJA

Konstruiranje je proces razvijanja proizvoda, usluge ili procesa kako bi se zadovoljile potrebe korisnika [14]. Inženjeri se oslanjaju na procese konstruiranja s kojima su upoznati i koji im pružaju strukturiranu raspodjelu konstrukcijskih aktivnosti i na taj način osiguravaju planiran i kontroliran rad. Takvi procesi temelje se na određenim načelima (principima) koja pomažu uspješnije i učinkovitije ubrzati vrijeme razvoja, smanjiti cijenu te povećati zadovoljstvo korisnika. Načela su većinom vezana uz područje rada, pa procesi temeljeni na njima imaju ograničenu primjenu. Metode koje implementiraju navedena načela nazivaju se algoritamske metode i orijentirane su cilju koji treba ispuniti. Kod algoritamskih metoda konstruiranje se temelji na generiranju algoritma za dani problem prema trenutnim najboljim primjerima u praksi. Odnosno, novi konstrukcijski problemi iziskuju razvijanje novih algoritama. Konstruiranje koristeći algoritme se koristi za uobičajene i jednostavne konstrukcije, ali zahtjeva puno vremena i ovisi o specifičnom problemu [15]. Osim toga, kompleksne probleme je teško opisati u algoritamskom obliku. Nam P. Suh 1977. godine predlaže pristup konstruiranju koji bi koristio univerzalno primjenjiva načela i naziva ga Aksiomatsko konstruiranje. Ovakav pristup nije ograničen samo na fazu koncipiranja nego je primjenjiv i u fazi detaljiranja, odnosno proizvodnje. Aksiomatsko konstruiranje je metodologija konstruiranja koja pruža sistematizirani i znanstveni pristup za formiranje konstrukcijskih problema, konceptualizaciju rješenja, eliminiranje loših ideja i donošenje odluka [14]. Suh smatra da bi nova generacija inženjera mogla konstruirati učinkovitije proizvode i sustave u većem vremenu kada bi ih nastavni plan podučio univerzalno primjenjivim načelima koja bi ih vodila kroz cjelokupni proces konstruiranja [16]. Drugim riječima, cilj Aksiomatskog konstruiranja je pružiti konstrukcijskim timovima teoretske i logičke osnove za određivanje najboljih rješenja među ponuđenima, te svladati psihološke prepreke kako bi se pronašlo najbolje rješenje za dani problem. Analizom dobrih konstrukcija, Suh zaključuje koji su njihovi zajednički elementi i postavlja dva osnovna aksioma konstruiranja [15]. Prema Suhu [15] dobra konstrukcija zadovoljava oba aksioma, dok loša konstrukcija ne. Aksiom je po definiciji istina koja se ne može dokazati, ali se može opovrgnuti protudokazom. Pojedini aksiomi objasniti će se kasnije u poglavlju.

Kako bi se omogućilo sistematiziranje procesa razmišljanja tokom konstruiranja uveden je koncept domena [15]. One razgraničavaju 4 različite konstrukcijske aktivnosti, pa se dijele



na korisničku, funkcijsku, fizičku i procesnu domenu. Aksiomatsko konstruiranje definira konstruiranje kao proces povezivanja (*mapping*) onoga što želimo postići u domeni koja se nalazi lijevo (u odnosu na desnu domenu) prema [Slika 3] sa kako to želimo postići u desnoj domeni [17].



**Slika 3. Prikaz povezanosti četiri domene s odgovarajućom hijerarhijom**

Pitanja ostaju ista u svakoj iteraciji, ali se mijenjaju objekti na koje se pitanja odnose. Proces povezivanja je proces određivanja karakteristika desne domene iz odnosa dviju domena koje promatramo[18]. Odnosno, domene međusobno djeluju jedna na drugu na različitim razinama, pa je potrebno pažljivo definirati na koji način desna domena zadovoljava lijevu. Dobar proces konstruiranja temelji se na učinkovitom procesu povezivanja. Budući da su domene povezane na ovaj način i objekti navedenih domena su međusobno povezani. Kao što je prethodno navedeno u Aksiomatskom konstruiranju razlikujemo četiri domene sa njima pripadajućim objektima:

1. Korisnička domena (*Costumer domain*): Uključuje attribute koje korisnik traži u proizvodu, sustavu, procesu ili materijalu. Objekti domene se nazivaju korisnikove potrebe (*customer needs*, CN ili *customer attributes*, CA).

2. Funkcijska domena (*Functional domain*): Uključuje funkcijske zahtjeve (*functional requirements*, FR) i ograničenja (*constraints*, Cs). Oni predstavljaju karakteristike koje je konstruktor definirao za proizvod iz korisnikovih potreba. Potrebno je razlikovati ograničenja od funkcijskih zahtjeva. Ograničenja postavljaju granice na prihvatljiva rješenja i razlikuju se od FR-a po tome što ne moraju biti nezavisna. Definiraju se prema tehničkim specifikacijama u fizičkoj i procesnoj domeni i moraju biti zadovoljena. Neka ograničenja postavljaju se na početka projekta, budući da se proizvod mora prilagoditi radnim uvjetima u kojima će se koristiti.
3. Fizička domena (*Physical domain*): Iz funkcijskih zahtjeva se definiraju dijelovi odnosno sklopovi koji ih ispunjavaju – konstrukcijski parametri (*design parameters*, DP).
4. Procesna domena (*Process domain*): Kako bi se mogao proizvesti proizvod definiran pomoću konstrukcijskih parametara razvijamo procese koji su opisani procesnim varijablama (*process variable*, PV)[15].

Budući da su domene međusobno povezane na prethodno opisan način njihov je poredak stalan. Ovakva dekompozicija je lateralna, a proces povezivanja je iterativan [15]. Odnosno, konstruktor se može vratiti u lijevu domenu na temelju ideja koje je dobio u desnoj domeni. S druge strane, ako promijenimo parametar u lijevoj domeni, potrebno je ponovno definirati parametar u desnoj domeni.

Primjena metode počinje na visokoj razini apstrakcije i razrađuje objekte u domenama do detaljnih elemenata, odnosno vrši se dekompozicija. Pomoću nje se dobiva povezanost, složenijih objekata na višoj razini sa više jednostavnijih objekata na nižoj razini, koja čini vertikalnu hijerarhiju FR-a, DP-a i PV-a u njima pripadajućim domenama. Odluke koje definiraju rješenje problema donesene na višim razinama utječu na definiciju objekta na nižim razinama. Jednako tako odluke o detaljiranju donesene na nižim razinama moraju zadovoljavati funkcijske zahtjeve i ograničenja postavljena na višim razinama. Odvija se proces u kojemu se izvodi cik-cak radnja (*zig-zagging*) između domena kako bi se postigla dekompozicija problema. Prvo idemo iz funkcijske domene u fizičku domenu kako bi se odredio DP s kojim je FR povezan, a zatim se vraćamo nazad u funkcijsku domenu kako bi se odredili FR-i određenih DP-a ali na nižoj razini hijerarhije. Nakon što su određeni FR-i niže razine ponovno idemo u fizičku domenu kako bi se odredili DP-i iste niže razine. Proces se ponavlja dok

rješenje nije u detaljirano do potrebne razine. Za dani FR moguće je imati više DP-a. Proces se iterira dok se ne odabere zadovoljavajući DP [14]. Jednak postupak izvodio bi se i za povezivanje fizičke i procesne domene, ali je u primjeni aksiomatskih principa glavni fokus najčešće na povezivanju funkcijskih zahtjeva i konstrukcijskih parametara, budući da je to središnji proces pri razvoju konceptijskih rješenja [19].

Važan zahtjev prilikom povezivanja je taj da funkcijski zahtjevi moraju biti definirani neutralno u odnosu na rješenja (*solution neutral*). Neutralnost u odnosu na rješenje predstavlja definiranje FR-a bez razmišljanja o postojećim rješenjima kako bi se stvarale kreativne ideje. Apstraktnije definiranje konstrukcijskih parametara na višim razinama, olakšava neutralnije definiranje FR-a na nižoj razini. Kada FR-i nisu neutralni u odnosu na rješenja, proces povezivanja rezultira očitim konstrukcijskim parametrima koji su implicirani u FR-ima. Odnosno, ograničen je prostor rješenja što može isključiti dobre ideje za zadovoljavanje FR-a [20]. Temeljna ideja aksiomatskog konstruiranja je da konačna konstrukcija ne može biti bolja od skupa funkcijskih zahtjeva koje je trebala zadovoljiti.

Potrebno je naglasiti da se Aksiomatsko konstruiranje ne primjenjuje samo u razvoju proizvoda (npr. Primjena Aksiomatskog konstruiranja na električnim biciklima [21]) već i za kompleksne sustave (npr. Analiza montažnih kuća pomoću Aksiomatskog konstruiranja [16]), razvoj softvera (npr. Razvoj softvera za obradu eksperimentalno dobivenih podataka o koroziji uz naprezanje korištenjem Aksiomatskog konstruiranja [22]) i materijala (npr. Poboljšanje konstrukcije hibridnih kompozitnih spojeva pomoću Aksiomatskog konstruiranja [23]), procese (npr. Prijelaz sa tradicionalne na proizvodnju po stanicama korištenjem Aksiomatskog konstruiranja [14]), i organizaciju (npr. Aksiomatsko konstruiranje primijenjeno na odabir taktike u američkom nogometu [24]). Unatoč raznolikosti područja, četiri domene je moguće primijeniti u različitim područjima tehnike, ali i drugim područjima ljudske djelatnosti (npr. organizacija, ekonomija, itd.).

Aksiomi koje je postavio Suh služe za usmjeravanje inženjera kroz proces konstruiranja. Prvi aksiom je aksiom nezavisnosti, a drugi se naziva informacijski aksiom. Potrebno je prvo zadovoljiti aksiom nezavisnosti, odnosno tek kada nekoliko rješenja zadovoljava prvi aksiom, koristi se informacijski aksiom kako bi se odabralo najbolje rješenje od predloženih. Dok prvi aksiom naglašava važnost eksplicitne formulacije konstrukcijskog problema, drugi aksiom se brine o izvrsnosti rješenja generiranih za dani problem.

## 2.1 Aksiom nezavisnosti

*Osigurati nezavisnost funkcijskih zahtjeva.*

Prvi aksiom pomaže pri donošenju dobrih odluka i omogućava provjeru ispravnosti procesa povezivanja u svakom trenutku. Aksiom nezavisnosti tvrdi da su u dobrom rješenju, DP-i i FR-i povezani tako da se pojedini DP može prilagoditi kako bi zadovoljio pridruženi FR bez utjecaja na ostale funkcijske zahtjeve [18]. Potrebno je odabrati skup DP-a kako bi se istovremeno ispunili svi FR-i i osigurala njihova međusobna nezavisnost. Neutralnost u odnosu na rješenje pozitivno utječe na postizanje nezavisnosti funkcijskih zahtjeva budući da se definiraju prije nego postoji parametar koji bi implicirao njihovu povezanost. Proces povezivanja domena može se opisati matematički koristeći vektorski prostor. Na danoj razini vektor FR-a je minimalni skup nezavisnih zahtjeva koji u potpunosti opisuje projektni cilj, a projektni cilj predstavljaju korisničke potrebe. Skup zahtjeva mora biti uzajamno isključujući i kolektivno sveobuhvatan (*mutually exclusive collectively exhaustive*, MECE)[25]. Uzajamno isključujući znači da se rješenja koja FR-i predlažu ne smiju međusobno preklapati. U slučaju da ovaj uvjet nije ispunjen dolazi do sparenosti rješenja koje će biti pojašnjene kasnije. Kolektivno sveobuhvatan znači da FR-i na nižoj razini daju potpuno rješenje problema definiranog FR-om na višoj razini, to jest ako FR-i neke razine nisu kolektivno sveobuhvatni dio rješenja će nedostajati. Budući da svaki FR ima pripadajući DP koji ga mora zadovoljiti i održati njegovu nezavisnost, i konstrukcijske parametre je moguće zapisati u obliku vektora. Veza između ova dva vektora može se zapisati na slijedeći način:

$$\{\mathbf{FR}\}_{m \times 1} = [\mathbf{A}]_{m \times p} \{\mathbf{DP}\}_{p \times 1} \quad (1)$$

Gdje je  $\{\mathbf{FR}\}_{m \times 1}$  vektor nezavisnih FR-a sa  $m$  elemenata,  $\{\mathbf{DP}\}_{p \times 1}$  vektor konstrukcijskih parametara sa  $p$  elemenata,  $[\mathbf{A}]_{m \times p}$  predstavlja matricu konstruiranja (*design matrix*)  $[\mathbf{DM}]$ . Drugim riječima  $m$  je broj funkcijskih zahtjeva, a  $p$  broj konstrukcijskih parametara koje analiziramo. Budući da se radi o vektorima veličine su otisnute podebljano. U matrici konstruiranja se stavlja oznaka  $X$  ondje gdje postoji povezanost između FR-a i DP-a koje promatramo, odnosno  $0$  gdje povezanost ne postoji. Oblik i dimenzije matrice  $A$  koriste se za klasifikaciju rješenja u jednu od slijedećih kategorija [14]:

- a) Nesparena (*uncoupled*): Konstrukcija koja u potpunosti ispunjava aksiom nezavisnosti, to jest u njoj je svaki specifični FR povezan sa samo jednim DP-om. Matrica je u ovom slučaju kvadratna dijagonalna, odnosno  $m = p$  i  $A_{ij} \neq 0$  kada je  $i = j$ ,  $A_{ij} = 0$  u svim

drugim slučajevima. Glavna odlika ovakve konstrukcije je neovisnost o redoslijedu ispunjavanja DP-a što omogućuje odličnu prilagodbu sustava promjenama koje mogu nastati u kasnijim fazama. Odnosno, potrebno je promijeniti samo jedan parametar po FR-u i to onaj DP koji je s istim povezan. Kompleksnost sustava je jednaka zbroju kompleksnosti pojedinih objekata i može se smanjiti djelovanjem na pojedine DP-e.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{22} & \cdot & \vdots \\ \vdots & \cdot & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_{mm} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_m \end{pmatrix} \quad (2)$$

- b) Djelomično sparena (*decoupled*): Kod ovakvih izvedbi gdje je jedan FR povezan s više DP-a dolazi do povrede aksioma. Do ovakve povrede dolazi i u sparenoj i u redundantnoj izvedbi. U ovom slučaju aksiom je i dalje zadovoljen, ali je nezavisnost FR-a ispunjena ako i samo ako su DP-i zadovoljeni točnim redoslijedom. Matematički gledano, kvadratna matrica konstruiranja je donjotrokatista ili gornjotrokatista.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & \vdots \\ \vdots & \cdot & \ddots & 0 \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mm} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_m \end{pmatrix} \quad (3)$$

- c) Sparena (*coupled*): Pravokutna matrica konstruiranja kod koje je  $m > p$ . Ne zadovoljava aksiom nezavisnosti, budući da je više FR-a povezano sa jednim DP-om. Potrebno je ponovno definirati DP-e dok se ne postigne nesparena ili djelomično sparena izvedba. U sparenoj konstrukciji promjena jednog FR-a, uzrokuje promjenu svih DP-a povezanih s njim kako bi sustav mogao ispravno raditi. Odnosno, zatajenje jedne komponente uzrokuje prestanak izvođenja više funkcija[7].

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1p} \\ A_{21} & A_{22} & \cdot & \vdots \\ \vdots & \cdot & \cdot & A_{(m-1)p} \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mp} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_p \end{pmatrix} \quad (4)$$

- d) Redundantna (*redundant*): Pravokutna matrica konstruiranja kod koje je  $m < p$ , odnosno postoje suvišni DP-i koji ne odgovaraju ni na jedan od nužnih FR-a. Prema tome potrebno je ukloniti suvišne DP-e.

U mnogim slučajevima određuju se preciznije vrijednosti unutar matrice konstruiranja. Odnosno, X-evi se zamjenjuju matematičkim izrazima i brojčanim vrijednostima koji su povezani sa DP-ima ako se javlja potreba za provjerom nezavisnosti u kasnijim fazama razrade.

Ovaj sustav jednadžbi može se riješiti bilo kojim redoslijedom za nesparenu konstrukciju ili redoslijedom koji određuje matrica konstruiranja kod djelomično sparenih konstrukcija.

Važno je naglasiti da je, za razliku od funkcijske nezavisnosti, fizička povezanost poželjna, ali samo ako ne uzrokuje sparenost funkcijskih zahtjeva. Limenka je primjer dobrog konstrukcijskog rješenja koje se sastoji od samo 3 dijela, a ima 12 DP-a, odnosno 12FR-a [15].

Procesom povezivanja moguće je dobiti veći broj djelomično sparenih rješenja. Zbog toga je kod kompleksnijih sustava teško procijeniti koje od rješenja ima minimalnu uparenost, što ima velik utjecaj na donošenje odluke o odabiru rješenja koje će se dalje razvijati. Kako bi se ocijenila mjera uparenosti uvedena su dva pojma, reangularnost (*reangularity*,  $R$ ) i semangularnost (*semangularity*,  $S$ ).  $R$  je mjera za ortogonalnost između DP-a i računa se kao apsolutna vrijednost umnoška sinusa svih kutova između različitih kombinacija parova DP-a matrice konstruiranja. Kao što je vidljivo na [Slika 4] kut između određena 2 parametra označava se sa  $\theta$ , pa za određeni par DP-a reangularnost glasi:

$$R = \sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \quad (5)$$

Kada je  $\theta = 90^\circ$  os  $DP_1$  okomita je na os  $DP_2$ , a reangularnost poprima vrijednost 1. Ako je navedeni kut manji od  $90^\circ$  DP-e je potrebno zadovoljiti točnim redoslijedom. Odnosno, što je konstrukcija više sparena to je vrijednost  $R$  manja. Ako imamo  $n$  FR-a i  $n$  DP-a i ako svaku vrijednost u matrici konstruiranja zapišemo kao  $A_{ij}$  (pri čemu  $i$  predstavlja broj retka, a  $j$  broj stupca u kojem se vrijednost nalazi) vrijednost  $R$  možemo dobiti i na slijedeći način:

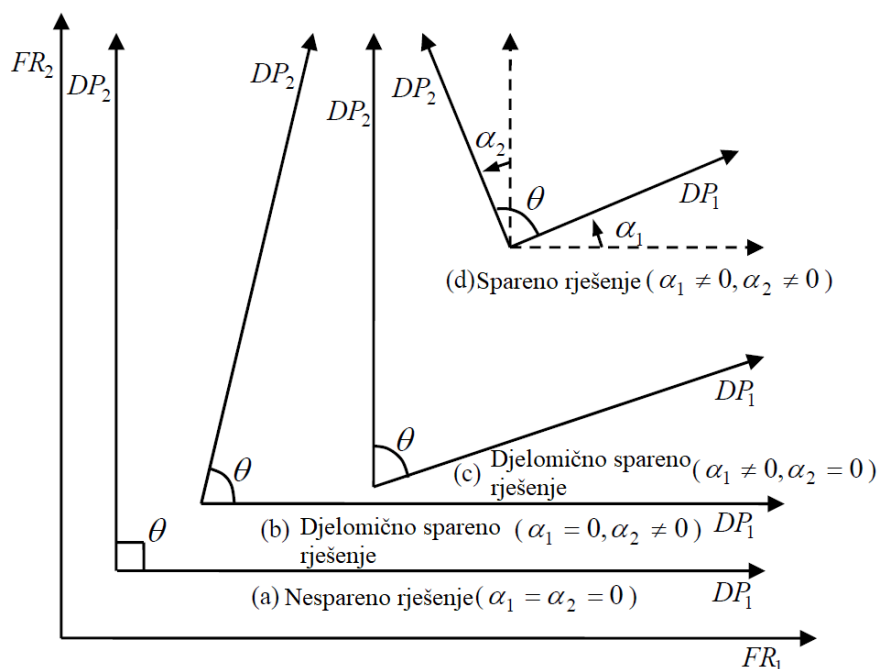
$$R = \prod_{\substack{i=1, n-1 \\ j=1+i, n}} \sqrt{1 - \frac{(\sum_{k=1}^n A_{ki} A_{kj})^2}{(\sum_{k=1}^n A_{ki}^2)(\sum_{k=1}^n A_{kj}^2)}} \quad (6)$$

Ali  $R$  sam po sebi nije dovoljan da prikaže sve slučajeve uparenosti, budući da  $R \rightarrow 1$  ne garantira da kutovi  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  teže u 1.  $\alpha_1$  predstavlja kut između određenog FR-a kojeg promatramo i njemu pridruženog DP-a, odnosno kut  $\alpha_2$  predstavlja kut između drugog FR-a kojeg promatramo i njemu pridruženog DP-a. Kako bi se točno mogla utvrditi uparenost uvodi se  $S$ , koji predstavlja kutnu mjeru paralelnosti para DP-a i FR-a, a može se izračunati izrazom:

$$S = \prod_{j=1}^n \frac{|A_{jj}|}{\sqrt{\sum_{k=1}^n A_{kj}^2}} \quad (7)$$

Slučaj  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  znači da je matrica konstruiranja dijagonalna, odnosno da  $S$  poprima vrijednost 1. Prema tome može se zaključiti da će kod idealne nesparene konstrukcije kutovi

poprimiti vrijednosti  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  i  $\theta = 90^\circ$  [18]. Ako bilo koji od kutova ima vrijednosti različite od prethodno navedenih, konstrukcija nije nesparena. Drugim riječima, za vrijednosti  $R = S = 1$  konstrukcija je nesparena, za  $R = S < 1$  konstrukcija je djelomično sparena, a kada je  $R \neq S < 1$  konstrukcija je sparena. Mogući slučajevi prikazani su grafički [Slika 4].



**Slika 4. Shematski pregled pojedinih rješenja analogno njihovoj uparenosti**

Matrica konstruiranja može se zapisati u obliku Jakobijeve matrice koja je tenzor 2. reda. Budući da se tenzori mogu prebaciti u oblik dijagonalne matrice ako se izvrši transformacija koordinata, isto vrijedi i za matricu konstruiranja. Unatoč tome, transformacija koordinata u kompleksnim konstrukcijama predstavlja samo promjenu međusobnih položaja elemenata i nema fizički značaj. Na primjer, funkcijski zahtjevi su isto tako sa matematičkog gledišta podložni mogućoj promjeni koordinata, ali bi taj postupak mogao utjecati na njihovu nezavisnost pa se transformacija izbjegava. Na sličan način, transformacija koordinata konstrukcijskih parametara uzrokovala bi da izvorni konstrukcijski parametri ovise o konačnima, te dolazi do kompliciranja njihove fizičke izvedbe, što ponekad u potpunosti onemogućuje realizaciju. Unatoč tome što ponekad transformacija koordinata može ukazati na moguće rješenje problema bez kršenja aksioma, prema [17] najbolja je strategija za izbjegavanje kompleksnosti, koja nastaje transformacijom koordinata, nalaženje dijagonalne matrice kao ispravnog rješenja pomoću alternacije postojećeg odabranog rješenja [15].

## 2.2 Informacijski aksiom

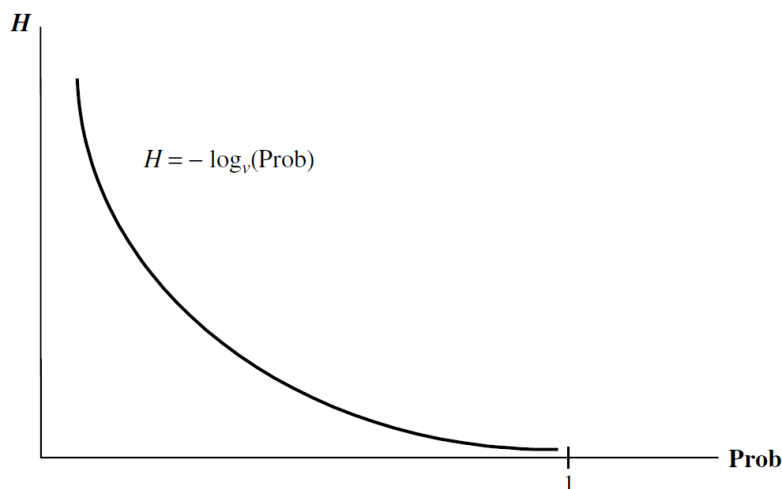
*Minimizirati količinu informacija u konstrukciji.*

Prema informacijskom aksiomu najbolje rješenje među onima koja zadovoljavaju aksiom nezavisnosti je ono koje treba najmanju količinu informacija za zadovoljavanje funkcijskih zahtjeva [17]. Aksiomatsko konstruiranje omogućava uklanjanje i minimiziranje slabosti predloženog rješenja, budući da one predstavljaju povredu aksioma. Jednu od glavnih povreda aksioma predstavlja kompleksnost kojom se između ostalog bavi informacijski aksiom. Ističu se tri komponente kompleksnosti pri konstruiranju, a to su osjetljivost (*vulnerability*), varijabilnost (*variability*) i povezanost (*correlation*) [14]. Cilj je izvesti matematičke veze koje kvantificiraju ove komponente kompleksnosti. Dobivene kvantitativne mjere pomažu prilikom izbora najboljeg od predloženih rješenja. Kompleksnost uzrokovana osjetljivošću je povezana sa sparenosti jer ona otežava kasnije prilagodbe rješenja i jedan je od pokazatelja povezanosti. Kompleksnost uzrokovana varijabilnošću se bavi postojećom varijabilnosti DP-a i PV-a i njihovom međusobnom povezanošću. Zbog povezanosti između DP-a, mijenjanje jednog DP-a uzrokuje promjenu ostalih s kojim je taj DP povezan, odnosno dodatnu varijabilnost. Potrebno je utjecati na sve 3 komponente kako bi se smanjila kompleksnost, budući da su međusobno povezane na prethodno opisan način. Tehnike smanjivanja kompleksnosti rješenja utjecajem na navedene komponente navedene su naknadno. Količina informacija (*information content*) se definira kao mjera kompleksnosti i povezana je s vjerojatnošću odvijanja određenih događaja ako je pružena informacija. Između rješenja koja su jednako prihvatljiva sa stajališta funkcionalnosti, samo je jedno superiorno u odnosu na druge po vjerojatnosti postizanja cilja koji je izražen funkcijskim zahtjevima [15]. Informacija i vjerojatnost (*Prob*) su međusobno vezani pomoću entropije (*H*) koja se definira na slijedeći način:

$$H = -\log_v(Prob) \quad (8)$$

gdje je *Prob* vjerojatnost zadovoljavanja određenog FR-a objektima u procesnoj domeni. Ako je baza logaritma  $v = 2$ , entropija se mjeri u bitovima, a u natovima ako je  $v = e$ . Nat je prirodna mjera informacija. Najveća vjerojatnost uspjeha ukazuje na najmanju količinu informaciju potrebnu za proizvodnju rješenja. U idealnom slučaju vrijednost količine informacija je nula [Slika 5].



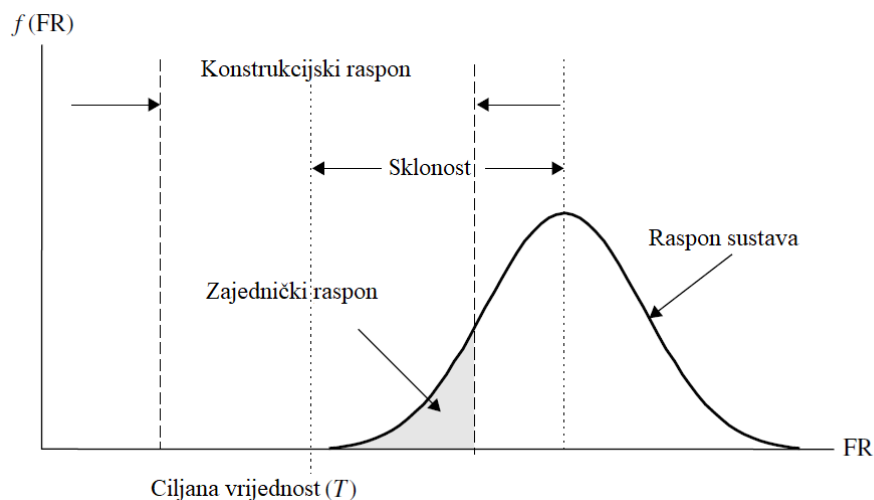


**Slika 5. Entropija (količina informacija) kao funkcija vjerojatnosti**

Rješenje se opisuje kao kompleksno ako je smanjena vjerojatnost uspjeha uzrokovana niskom vjerojatnošću uspjeha zadovoljavanja FR-a. To znači da na kompleksnost utječe i broj FR-a i njihova vjerojatnost uspjeha. Prema tome, kada postoji više FR-a na istoj razini koje je potrebno zadovoljiti koristi se logaritamska funkcija kako bi količina informacija bila aditivna:

$$H_L = -\log_v \left( \prod_{i=1}^m \text{Prob}_i \right) = -\sum_{i=1}^m \log_v(\text{Prob}_i) \quad (9)$$

gdje je  $L$  razina hijerarhije, a  $m$  veličina vektora FR-a na promatranoj razini. Kako bi se smanjila kompleksnost najčešće se utječe na objekte s najvećim utjecajem na sumu. Odnosno na onaj objekt čija logaritamska funkcija daje najveću vrijednost. Kompleksna konstrukcijska rješenja su teža za proizvesti i uključuju korištenje složenijih proizvodnih sustava, procesa i procedura [14]. Posljedica kompleksnosti su dodatni operativni troškovi i pogoršana kvaliteta. Iz navedenoga se može zaključiti da su PV-i nasumične varijable, a budući da su s njima povezani, i DP-i su nasumične varijable. Isto se primjenjuje i na FR-e. Prema tome, vektori FR-a su na svim razinama nasumične varijable i potrebno ih je izvesti sa prihvatljivom tolerancijom koju određuje kupac [14]. Ciljana vrijednost se označava sa  $T$ , dozvoljeno odstupanje zahtjeva sa  $\Delta FR$ , te se dobiva  $T \pm \Delta FR$  kao konstrukcijski raspon (*design range*, DR) koji predstavlja područje koje ispunjava zahtjeve korisnika. Sposobnost sustava da određenim procesom proizvede dio unutar traženog okvira naziva se raspon sustava (*system range*, SR). zajednički raspon (*common range*, CR) predstavlja presjek konstrukcijskog raspona i raspona sustava.



**Slika 6. Definicija vjerojatnosti uspjeha**

Funkcija gustoće vjerojatnosti (*probability density function*, PDF) se ucrtava preko raspona sustava za određeni FR ako se radi o povezivanju funkcijske i fizičke domene, odnosno za određeni DP, ako se radi o povezivanju fizičke i procesne domene. Područje ispod funkcije gustoće vjerojatnosti je vjerojatnost sustava da ispuni traženi cilj. Pojam sklonost (*bias*) definira se kao razlika između srednje vrijednosti FR-a u raspodjeli raspona sustava i ciljane vrijednosti. Vjerojatnost uspjeha definira se kao površina ispod PDF krivulje omjera raspona sustava i zajedničkog raspona [Slika 6]:

$$H = -\log_v \left( \frac{SR}{CR} \right) \quad (10)$$

Postoji nekoliko tehnika za smanjivanje količine informacija, a time i smanjenje kompleksnosti. Među njima se ističu:

- a) Eliminacija sklonosti (*Bias Elimination*): Sklonost se smanjuje odnosno uklanja promjenom srednje vrijednosti određenog DP-a kako bi se vrijednost pripadajućeg FR-a postavila u ciljanu vrijednost.
- b) Smanjenje varijantnosti (*Variance Reduction*): Povećanjem tolerancije određenog DP-a, smanjuje se utjecaj promjene istog na pripadajući FR.
- c) Proširenje konstrukcijskog raspona (*Design Range Widening*): Postavlja se najveća moguća tolerancija prilikom definiranja FR-a.
- d) Smanjenje kompleksnosti integracijom DP-a (*Reduction of Complexity through Integration of DPs*): Cilj je integrirati više DP-a u jedan dio ili sklop bez ugrožavanja nezavisnosti FR-a.

Unatoč tome što se ovim tehnikama postiže robusnost rješenja, odnosno smanjuje osjetljivost na varijacije, potrebno je nakon primjene provjeriti je li ugrožena kvaliteta konačne konstrukcije.

## 2.3 Istaknuti teoremi i korolari

U Aksiomatskom konstruiranju konstrukcijsko se znanje vezano uz specifična područja sistematizira izvođenjem teorema i korolara (*corollaries*) iz navedenih aksioma. Odnosno, teoremi i korolari su valjani ako se njihovom primjenom ne krše prvi i drugi aksiom i ograničenja postavljena na projekt. Oni služe kao dodatne smjernice tokom korištenja teorije Aksiomatskog konstruiranja, te ih je kao takve također potrebno ispuniti. Ovdje će se navesti samo oni korišteni prilikom pisanja ovog rada [15]:

Teorem 1: Broj konstrukcijskih parametara ne smije biti niži od broja funkcijskih zahtjeva.

Teorem 4: Idealna konstrukcija ima jednak broj konstrukcijskih parametara i funkcijskih zahtjeva.

Teorem 5: Kada se promijeni skup FR-a na bilo koji način, postojeći DP-i ne mogu ispuniti novonastale FR-e. Kao posljedica toga, potrebno je naći novo konceptualno rješenje.

Teorem 18: Kvaliteta konstrukcije ovisi o odabiru FR-a i povezivanju domena. Pogrešan odabir na najvišim razinama ne može se ispraviti kroz donošenje odluka na nižim razinama.

Korolari 1: Potrebno je odvojiti dijelove ili aspekte rješenja ako su FR-i spareni ili međusobni zavisni u predloženom rješenju.

Korolari 2: Minimizirati broj FR-a i ograničenja.

Korolari 3: Ugraditi svojstva u jedan fizički dio ako pri takvom rješenju FR-i mogu zadržati nezavisnost.

## 2.4 Primjena Aksiomatskog konstruiranja u evaluaciji koncepata

Aksiomatsko konstruiranje se može koristiti za stvaranje novih, te optimizaciju i evaluaciju postojećih konstrukcija, proizvodnih procesa, materijala i organizacija. Osim toga metoda pruža novi pristup donošenju odluka [7] i omogućava pravovremeno uočavanje mogućih konflikata nastalih prilikom generiranja konceptualnih rješenja zbog prirode aksioma nezavisnosti. Za pravilno provođenje evaluacije potrebno je biti dobro upoznat sa potrebama

korisnika jer se iz njih definiiraju svi zahtjevi postavljeni na konačan proizvod. Odnosno, nije moguće evaluirati valjanost odabranih funkcijskih i nefunkcijskih zahtjeva te ograničenja ako ne znamo što se njima želi postići. Iz početno definiranih FR-a vrši se proces povezivanja i analizira njegova valjanost. To jest, njime se dobivaju matrice konstruiranja koje nam direktno ukazuju na valjanost rješenja. Osim toga, kako bi se mogla procijeniti uspješnost primjene metode, važno je poznavati koji su njeni ciljevi, odnosno što za određenu metodu predstavlja idealno rješenje. Prema Aksiomatskom konstruiranju idealni sustavi [26]:

- su prikladni za postizanje učinka definiranog preko ciljanih vrijednosti
- su pod manjim utjecajem naknadnih promjena koje su posljedica prvotne nesigurnosti
- zamjenjuju postojeće sustave tako što smanjuju kompleksnost razdvajanjem funkcija na više dijelova kako bi se zadovoljio aksiom nezavisnosti

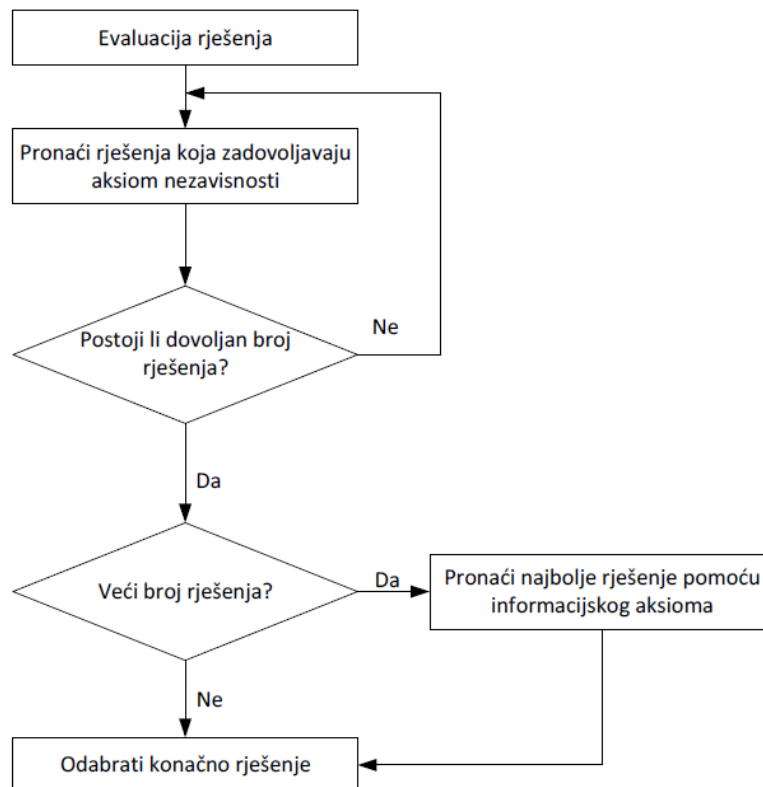
Jedan od težih zadataka s kojim se susreću inženjeri je ispravno definiranje potreba korisnika, budući da su informacije prikupljene od korisnika netehničke i subjektivne prirode. Evaluacija bi trebala dati uvid u ispunjenost potreba korisnika. Većina njih se ispunjava u okviru funkcijskih zahtjeva, a ostale potrebe transformiraju se u netehničke zahtjeve. Jedan od nedostataka evaluacije pomoću Aksiomatskog konstruiranja je što se netehnički zahtjevi definiiraju kao ograničenja o kojima konstruktor treba razmišljati tokom procesa generiranja rješenja. Takvi zahtjevi ne ulaze u samu matricu konstruiranja pa ne ulaze ni u rezultate dobivene metodom. To znači da rješenje dobiveno kao najbolje može biti iznimno skupo, neestetsko, ili općenito ne zadovoljiti potrebe korisnika ako konstruktor ne bude tome pridao dovoljno pažnje [7]. Tako na primjer, korisnici odabiru hladnjak sa vertikalnim vratima iako hladnjak sa horizontalnim vratima predstavlja bolje rješenje prema Aksiomatskom konstruiranju. Uzrok tome je što glavni kriteriji u ovom primjeru predstavlja smanjeni gubitak energije, a ne jednostavno uzimanje namirnica što je većini korisnika prioritet [18]. Primjer u kojem se primjenjuje Aksiomatsko konstruiranje na električnom biciklu također naglašava važnost prikupljanja što veće količine podataka o proizvodu proučavanjem tržišta i skupljanjem podataka iz što više različitih izvora uključujući prodavače, korisnike, ali i osoblje unutar tvrtke [21]. Također, potrebno je razlikovati važnost potreba jer nisu sve jednako važne. Odnosno, FR-i trebaju biti formulirani tako da ispunjavaju potrebe koje su korisnicima prioritet, a ne moguće potrebe tvrtke ili zadatke postavljene inženjeru [27]. Jedan od nedostataka Aksiomatskog konstruiranja je otežano povezivanje korisničke i funkcijske domene zbog količine podataka, te je poželjno u toj fazi kombinirati Aksiomatsko konstruiranje s drugim

metodama. Kao pomoć pri generiranju funkcijskih zahtjeva mogu poslužiti druge metode poput Kuće kvalitete [12]. Primjena TRIZ metode omogućuje integriranje više DP-a u jedan dio a da se pritom osigurava nesparenost rješenja [14].

Evaluacija se provodi na više različitih rješenja s jednakim ciljem kojeg u kontekstu Aksiomatskog konstruiranja predstavljaju funkcijski zahtjevi [18]. Kako bi se lakše izvršila evaluacija poželjno je da su za sva rješenja postavljeni jednaki funkcijski zahtjevi. Nažalost, to nije uvijek moguće postići, budući da pojedino rješenje može zadovoljavati potrebe korisnika s više funkcijskih zahtjeva ili različitim funkcijskim zahtjevima u odnosu na druga rješenja. Prilikom evaluacije različitih tarnih spojki koje služe za sprječavanje preopterećenja prilikom spuštanja rezervnog kotača vozila javlja se ovakav problem [12]. Izvršene su posebne dekompozicije za svako od 3 postojeća rješenja tarnih spojki. Rješenja su se prvo analizirala prema aksiomu nezavisnosti preko dobivenih matrica konstruiranja, unatoč tome što su se FR-i u matricama razlikovali. Nakon toga izvršena je i evaluacija pomoću drugog aksioma na temelju utjecaja dimenzijskih grešaka na postizanje željenog okretnog momenta. Odabrano je rješenje koje je nabolje ispunilo oba aksioma, odnosno ima najmanju količinu informacija i najmanju sparenost.

Prilikom razvoja novih proizvoda korištenje metrike olakšava dobivanje boljih FR-a, a u evaluaciji se koristi kao pokazatelj koliko su dobro ispunjene potrebe korisnika. Najčešće je to funkcijska metrika (*functional metrics*, FM) koja opisuje povezanost između više i niže razine FR-a u hijerarhiji. To jest, dio funkcijske metrike je prikazivanje da FR-i na nižoj razini daju potpuno rješenje problema definiranog FR-om na višoj razini (kolektivna sveobuhvatnost) i kao takva sudjeluje u definiranju FR-a na nižoj razini. Osim toga, FM za određeni FR treba ukazati na to koliko je dobro ispunjen CN. FM-om treba biti iskazano što je potrebno mjeriti kako bi određeni FR ispunjavao svoju funkciju [20] i koliko uspješno određeni DP zadovoljava određeni FR. Konstrukcijski parametri se dobivaju prema funkcijskim zahtjevima procesom povezivanja, a pritom svako od rješenja može imati drugačije parametre. Primjer pravilne implementacije metrike korištenjem Suhovih aksiomatskih principa je korištenje metode za odabir taktike u američkom nogometu [24]. U ovom se primjeru mjere posjed lopte, prekidi, pogrešno rukovanje loptom, itd. Prema tim vrijednostima odabire se taktika kako bi se pozitivno utjecalo na ukupni rezultat. Korištenje metrike omogućilo je testiranje uspješnosti metode prije njene implementacije.

Iz procesa povezivanja dobivene su matrice konstruiranja koje također daju uvid u to koliko je rješenje valjano, jer se na temelju njih može zaključiti koliko rješenje odstupa od idealnog. Ako jedno ili više postojećih rješenja ima nesparenu matricu konstruiranja, prema prvom aksiomu ta rješenja su najbolja. U slučaju da postoji više djelomično sparenih rješenja provjeravamo u kojoj mjeri svako od njih zadovoljava prvi aksiom izračunavanjem sparenosti pomoću reangularnosti i semangularnosti. Analiza se vrši unutar pojedinog rješenja, a potom i između koncepata. U većini slučajeva, količina informacija je smanjena ako je aksiom nezavisnosti zadovoljen. Odnosno, ako se pronađe samo jedno rješenje koje zadovoljava aksiom nezavisnosti, Aksiomatsko konstruiranje nalaže da je ono najbolje. Zato se ponekad čini da nije potrebno koristiti informacijski aksiom prilikom evaluacije koncepata [28]. Unatoč tome, potrebno je uzeti u obzir da postoje slučajevi u kojima sparena konstrukcija ima manju količinu informacija od nesparene. Budući da prema aksiomatskim principima sparno rješenje ne može biti bolje od nesparnog, potrebno je naći rješenje koje bi bilo nesparno ili djelomično sparno. Ako se dođe do više rješenja koja zadovoljavaju aksiom nezavisnosti koristi se informacijski aksiom za odabir najboljeg rješenja [Slika 7].



**Slika 7.** Dijagram toka za evaluaciju pomoću Aksiomatskog konstruiranja [18]

Za razliku od ostalih metoda poput AHP-a i Pugh-ove metode kod kojih konstruktori samo dodjeljuju vrijednosti temeljene na njihovom dotadašnjem iskustvu, kod Aksiomatskog konstruiranja najbolje rješenje bira se prema količini informacija koju je moguće točno izračunati koristeći drugi aksiom. Zbog toga se drugi aksiom uglavnom primjenjuje u evaluaciji, dok se u općenitoj primjeni metode javlja u samo nešto više od 25% slučajeva [28]. Nakon što je izvršena evaluacija rješenja, ustanovljeno je koliko se razlikuju od idealnog rješenja, na temelju čega je moguće predložiti poboljšanja.

## 2.5 Najčešće pogreške koje se javljaju prilikom primjene Aksiomatskog konstruiranja

Unatoč pogreškama poput preranog gubitka neutralnosti rješenja, loše ili nedovoljno provedene dekompozicije, prisutnosti latentnih potreba, itd., glavnu skupinu pogrešaka prilikom primjene Aksiomatskog konstruiranja predstavljaju pogreške koje nastaju prilikom definiranja FR-a. Ističu se jer FR-i postavljaju temelje za sve velike korake u procesu primjene Aksiomatskog konstruiranja, kao što su dekompozicija, proces povezivanja domena, stvaranje matrica konstruiranja, itd. Prema [27] razlikujemo pet načina pogrešnih definiranja FR-a:

1. Zamjena FR-a sa konstrukcijskim parametrima: Očituju se u pojavi informacija o dijelovima (ili sklopovima) u FR-ima na višim razinama. Definicija stavlja naglasak na imenicu (što izvršava radnju) umjesto na glagol (kako se radnja izvršava). U ovaj tip pogrešaka spada i korištenje glagola *koristiti* (npr. *rješenje treba koristiti ovaj materijal*) ili *imati* (npr. *rješenje treba imati ovu komponentu*).
2. Zamjena FR-a sa drugim vrstama zahtjeva: Iz korisnikovih potreba osim funkcijskih zahtjeva definiraju se i dodatne vrste zahtjeva. U njih spadaju ograničenja sustava (*system constraints*), ne-funkcijski zahtjevi (nFR), ulazna ograničenja (*input constraints*), kriteriji odabira (*selection criteria*, SCs) i kriteriji optimizacije (*optimization criteria*, OCs). Ograničenja sustava su nametnuta od strane sustava u kojem rješenje mora raditi te ih često postavlja sama tvrtka unutar koje se razvija proizvod i prema tome nisu posljedica potreba korisnika. Ne-funkcijski zahtjevi opisuju kakvo bi rješenje trebalo biti i koje osobine i svojstva treba imati. Prepoznaju se po korištenju glagola *biti* (npr. *rješenje treba biti jednostavno*), ali i po tome što se odnose na korisnikov doživljaj proizvoda (kako izgleda, miriše, itd.). Ulazna ograničenja postavljaju čvrstu granicu na kvantitativne vrijednosti kao što su cijena, masa, radna temperatura, itd. Prepoznaju se po tome što se u FR-ima nalaze apsolutne granice na

rješenje ili komparativne riječi (npr. barem, više od, manje od). Kriterij odabira su elementi po kojima se definira poredak izvrsnosti pojedinih rješenja. Pomažu konstruktoru da odabere najbolje (najlakše, najjeftinije, itd.) rješenje među ponuđenima, odnosno ne ukazuju na funkciju koju rješenje treba izvršiti. Kriterij optimizacije ukazuju na to koje konstrukcijske parametre je potrebno poboljšati i kojim redoslijedom je to potrebno činiti. Kriterije odabira i optimizacije se prepoznaju jer koriste superlative ili prijelazne glagole (npr. smanjiti, povećati).

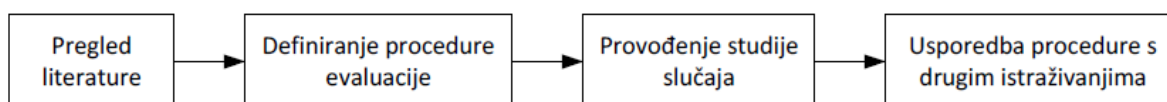
3. Zamjena FR-a rješenja i sudionika: FR-i su zapisani tako da predstavljaju ograničenja konstruktora ili zahtjeve koje oni moraju ispuniti (npr. *smanjiti količinu korištene plastike*). Jednako tako, pogrešno definirani FR-i uključuje funkcije koje se odnose na korisnika (npr. *otvoriti bocu*).
4. Zamjena FR-a rješenja i sustava uz koje je rješenje vezano: FR-i se definiraju kao funkcije koje mora izvršiti tvrtka koja proizvodi rješenje (npr. *smanjiti cijenu materijala za 20%*), odnosno proizvodni sustav.
5. Negativni FR-i: Definiraju što rješenje ne bi smjelo činiti. Većinom se radi o potrebama korisnika koje još nisu pretvorene u oblik s kojim radi konstruktor. Uz zamjenu FR-a sa DP-ima predstavljaju najveću pogrešku i povredu aksioma.

Zamjena FR-a sa DP-ima i definiranje negativnih FRa predstavljaju najveće povrede aksioma, odnosno sa FR-ima definiranim na taj način nije moguće ostvariti prednosti korištenja Aksiomatskog konstruiranja. Zbog toga je potrebno tokom definiranja FR-a provjeravati njihovu ispravnost i slijediti smjernice za izbjegavanje mogućih pogrešaka.



### 3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Korake koji su provedeni tokom istraživanja moguće je prikazati dijagramom toka [Slika 8]. Proučavanje literature je provedeno tokom cijelog istraživanja s ciljem dobivanja općeg uvida u područje evaluacije i detaljniji uvid u metodu koja se primjenjuje. Na početku je bilo potrebno upoznati se sa osnovnim principima Aksiomatskog konstruiranja. Zatim je izvršen pregled literature za različite metode evaluacije uključujući i onu unutar Aksiomatskog konstruiranja kako bi se mogla pravilno definirati procedura za provedbu evaluacije unutar istraživanja. Procedura uključuje prepoznavanje i definiranje zahtjeva, generiranje matrica konstruiranja prema načelima Aksiomatskog konstruiranja i evaluaciju prema dobivenima matricama. Za svaki od ovih koraka bilo je potrebno dodatno proučiti literaturu kako bi se metoda uspješnije primijenila. Na temelju predložene procedure provedena je studija slučaja. Na kraju je provedena usporedba procedure s drugim istraživanjima kako bi se ustanovile prednosti i mane iste, odnosno donio bolji zaključak o rezultatima koji su dobiveni njenom primjenom.



Slika 8. Dijagram toka predložene metodologije istraživanja

#### 3.1 Definiranje zahtjeva

Iz smjernica dobivenih od partnerske tvrtke, zakonskih obveza i ostalih prikupljenih informacija definirane su potrebe korisnika na najvišoj razini, ograničenja i ne-funkcijski zahtjevi. Osim potreba korisnika koje ulaze u dekompoziciju, ispunjenost ostalih vrsta zahtjeva nije moguće direktno provjeriti Aksiomatskim konstruiranjem. Proces definiranja zahtjeva je bilo potrebno ponoviti nekoliko puta budući da su uz pomoć [27] prepoznate greške u njihovoj definiciji. Direktno iz potreba korisnika definirani su FR-i na najvišoj razini neovisno o rješenjima koje predlažu koncepti. FR-e definirane na ovaj način sva rješenja moraju barem djelomično zadovoljavati jer inače nije ispunjena osnovna funkcija proizvoda. Taj pristup preuzet je iz rada o evaluaciji tarnih spojki [12], gdje su tek na trećoj razini dekompozicije FR-i, odnosno DP-i, vezani za specifična rješenja koja se evaluiraju.

### 3.2 Generiranje inicijalnih matrica

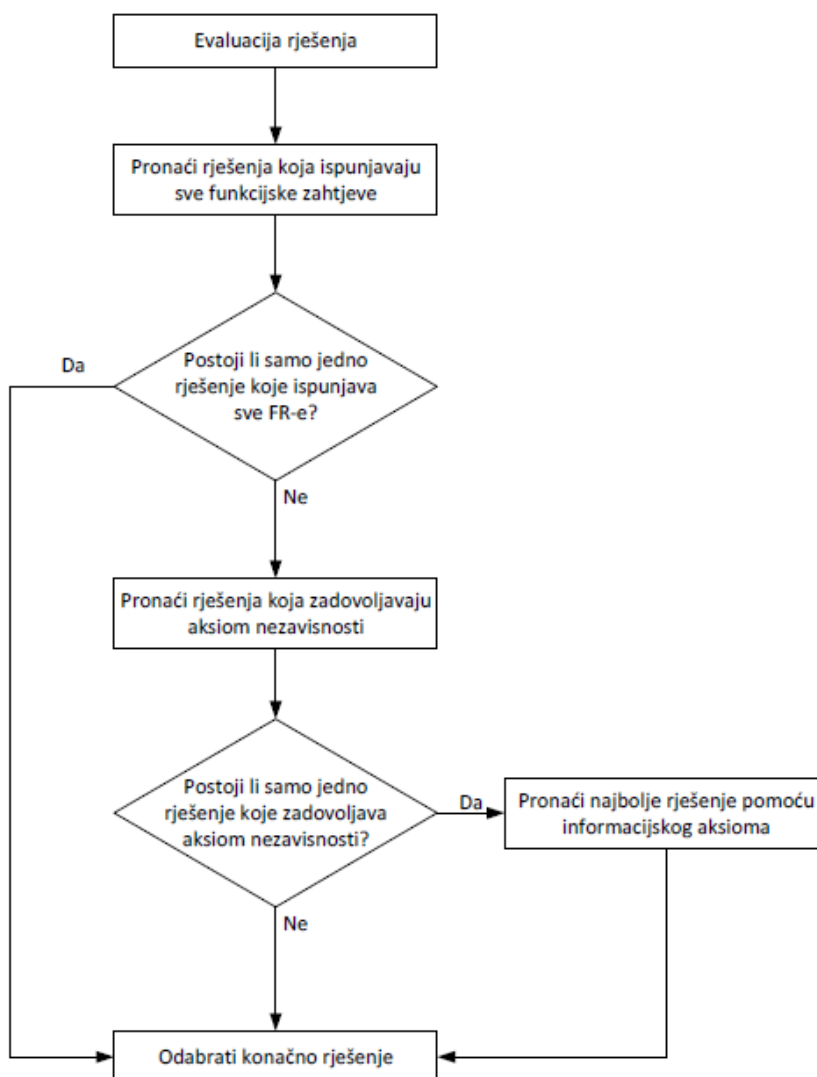
Prema početno definiranim FR-ima izvršena je dekompozicija na svim razinama kako bi se dobio ukupan uvid u problem, odnosno kako bi se odredile funkcije koje uređaj sadrži. Napravljena je i analiza funkcija koje sadrže postojeća rješenja koja se evaluiraju kako bi se dodali funkcijski zahtjevi koje ti koncepti mogu sadržavati. Već u ovom trenutku rješenje se odmiče od idealnog, budući da dodani FR-i možda nisu posljedica pravih korisnikovih potreba. Uzrok tome je što su različiti konstruktori odabrali različite FR-e niže razine da zadovolje FR na višoj razini te prilikom dodavanja svih varijanti dolazi do njihovog međusobnog preklapanja. Unatoč tome, bez njihova dodavanja u osnovnu dekompoziciju ne bi bilo moguće izvesti evaluaciju. Prvotno dobivene matrice bile su sparene i nisu bile u skladu sa principima Aksiomatskog konstruiranja. Odnosno, došlo je ili do preklapanja FR-a ili nepotpunog iskaza rješenja problema pomoću FR-a na nižim razinama. Iz toga je razloga proveden proces iteriranja u kojem su se preformulirali funkcijski zahtjevi kako bi se postigao pravilan odnos između FR-a na višoj i nižoj razini, ranije opisan kao MECE. Nakon što su na ovaj način definirani FR-i, neke od matrica su i dalje bile sparene. Zatim se na sparenost matrica pokušalo utjecati pomoću promjene redoslijeda ispunjavanja FR-a. Ako djelomična sparenost nije postignuta na ovaj način, ponovno smo se vratili korak nazad na preformuliranje FR-a. Ako je postignut oblik djelomične sparenosti, odnosno nesparenosti matrice konstruiranja na najvišoj razini, matrice na nižim razinama moraju također biti djelomično sparene ili nesparene, odnosno nesparene.

Sparenosti koje se pojavljuju u matrici konstruiranja na najvišoj razini između FR-a i DP-a također se pojavljuju i na nižim razinama. Odnosno, ako na  $FR_1$  utječe parametar  $DP_2$  onda jedan ili više konstrukcijskih parametara na nižim razinama dobivenih dekompozicijom  $FR_2$  mora utjecati na  $FR_1$ . Također vrijedi i obrnuto, ako na najvišim razinama ne postoji sparenost, ne smije se javljati niti na nižim razinama.

### 3.3 Evaluacija koncepata prema dobivenim matricama konstruiranja

Inicijalno dobivene matrice konstruiranja ukazuju na sparenost unutar određenih funkcijskih zahtjeva. Ove matrice uključuju rješenja svih koncepata i nisu dovoljne za provođenje evaluacije, budući da nisu vezane za određeni koncept nego predstavljaju općenitu dekompoziciju problema. Osim toga, njima nije prikazana povezanost konstrukcijskih parametara najnižih razina na sve definirane FR-e. Kako bi se to postiglo matrice konstruiranja nižih razina uvrštavaju se u matrice viših razina, sve dok se ne dobije po jedna konačna matrica

za svaki pojedini koncept. Zbog preglednosti u konačnim matricama izostavljene su 0 tamo gdje nema povezanosti. U konačnoj matrici redove predstavljaju FR-i, a stupce DP-i. Iz dobivene matrice se analizira ukupno rješenje promatranjem utjecaja pojedinih DP-a na svaki od FR-a. Odnosno, na ovaj način se promatra međusobna povezanost podsustava i funkcija koje obavljaju njihovi dijelovi. Može se dogoditi da su kod koncepata određeni konstrukcijski parametri spareni sa funkcijskim zahtjevima, a da to nije bilo predviđeno matricom na najvišoj razini. Na primjer, ako je matrica konstruiranja na najvišoj razini nesparena, spajanje bilo kojeg DP-a i FR-a izvan dijagonale u konačnoj matrici ukazuje na to da se promatrano rješenje udaljava od idealnog. Ustanovljeno je da je potrebno prvo provjeriti zadovoljavaju li sva predložena rješenja postavljene funkcijske zahtjeve [Error! Reference source not found.] budući da će, u slučaju da samo jedno rješenje zadovoljava sve FR-e, ono biti najbolje.



**Slika 9. Modificiran dijagram toka za evaluaciju pomoću Aksiomatskog konstruiranja**

Ako pojedini koncept ne ispunjava određeni funkcijski zahtjev, odnosno nema određeni konstrukcijski parametar, taj redak, odnosno pripadajući stupac, maknut je iz matrice. Prema tome se može zaključiti da će matrica manjih dimenzija ispunjavati manje funkcijskih zahtjeva i vjerojatnije je da ne ispunjava u potpunosti potrebe korisnika. Iz toga je razloga promijenjen pristup evaluaciji u odnosu na predložen postupak prikazan ranije [Slika 7]. Prilikom evaluacije prioritet je ispunjavanje funkcijskih zahtjeva na drugoj razini, budući da na nižim razinama funkcijski zahtjevi nisu uzajamno isključujući. To jest, ako na nižim razinama nisu ispunjene sve funkcije, pripadni FR više razine i dalje može biti u potpunosti ispunjen. Ali, Aksiomatsko konstruiranje ne ukazuje na to kojim FR-ima na drugoj razini treba dati prednost pa se unatoč nepotpunosti rješenja primjenjuje aksiom nezavisnosti za dodatnu evaluaciju. Evaluacija prema aksiomu nezavisnosti vrši se analizom nedijagonalnih elemenata i računanjem vrijednosti reangularnosti i semangularnosti. U slučaju da iz tih vrijednosti također nije moguće izvući konačan zaključak, za evaluaciju se primjenjuje i drugi aksiom iako literature savjetuje protiv toga [18]. Naime, drugi aksiom za razliku od prvoga uzima u obzir dodatna ograničenja postavljena na rješenje, a ne samo FR-e, te pomaže prikazati koje rješenje bolje zadovoljava zadan problem.

## 4 PRIMJENA PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA PRIMJERU KONCEPATA RAZVIJENIH TIJEKOM EGPR KOLEGIJA

U ovom radu Aksiomatsko konstruiranje koristi se za evaluaciju koncepata skutera za mobilnost razvijenih tokom kolegija European Global Product Realization. Skuteri za mobilnost su električno pogonjena vozila konstruirana za ljude s ograničenom pokretljivošću. Projektni cilj je bio konstruirati skuter za mobilnost koji je prilagođen raznim skupinama ljudi, dovoljno lagan da ga jedna osoba može jednostavno podići i nositi, i može stati u prtljagu autobusa ili aviona. Na početku kolegija izvršila se analiza tržišta na temelju koje su razvijeni koncepti. Između 20-ak koncepata odabrano je 5 na kojima je provedeno detaljiranje, te su kasnije izrađeni njihovi prototipi. Nakon što su proizvodi izrađeni, odabrano je 4 za evaluaciju pomoću principa Aksiomatskog konstruiranja kako bi se tražila moguća unapređenja.

### 4.1 Definiranje zahtjeva

U EGPR kolegiju studenti surađuju sa industrijskim partnerom, odnosno predstavnikom tvrtke za koju se proizvod razvija. Kako bi se osiguralo da studenti ostvare cilj koji tvrtka želi postići, ona postavlja određena ograničenja na rješenja. U slučaju skutera za mobilnost tvrtka je postavila ograničenja sustava koja su se morala ispuniti i ulazna ograničenja koja predstavljaju idealne vrijednosti za parametre mjerene na izrađenim prototipima. Osim ograničenja koja je postavila tvrtka i koje su posljedica zakonske regulative za skutere za mobilnost ističu se i potrebe korisnika te ne-funkcijski zahtjevi. Potrebe korisnika su dobivene istraživanjem postojećih proizvoda na tržištu i provođenjem intervjua sa korisnicima skutera za mobilnost. Na temelju svih skupljenih informacija istaknute su 4 potrebe na najvišoj razini iz kojih se direktno dobivaju FR-i najviše razine. Istaknuti su najbitniji ne-funkcijski zahtjevi jer sadrže svojstva čije ispunjavanje može predstavljati korisnicima predstavljati veliku prednost. Kao takve potrebno ih je imati na umu tokom procesa konstruiranja, odnosno u ovom slučaju evaluacije.

Potrebe korisnika na najvišoj razini:

1. Sigurnost korisnika
2. Mogućnost sklapanja i prenošenja
3. Pouzdan prijevoz korisnika od točke A do točke B
4. Proizvod prilagođen za korištenje osobama svih starosti

Ne-funkcijski zahtjevi:

- a) Omogućiti rastavljanje
- b) Pružiti udobnost
- c) Omogućiti jednostavno čišćenje
- d) Osigurati estetiku konstrukcije
- e) Omogućiti jednostavno korištenje

Ograničenja sustava:

- a) Uređaj ne smije koristiti fosilna goriva
- b) Baterije moraju biti odvojive

Prilikom generiranja koncepata ova ograničenja nisu smjela biti prekršena tako da ih sva ponuđena rješenja zadovoljavaju. Dodatno, iako to nije bilo ograničenje, svi koncepti su na kraju izvedeni sa motorom integriranim u prednji kotač.

Ulazna ograničenja:

- a) Masa mora biti manja od 10 kg
- b) Baterije moraju omogućiti domet vozilu minimalno 16km
- c) Maksimalna brzina koju je moguće postići je 6 km/h
- d) Nagib po kojem se uređaj mora moći uspeti je 6°
- e) Maksimalne sklopljene dimenzije su 90x70x40cm

Neka ulazna ograničenja je postavila partnerska tvrtka, pa ne predstavljaju potrebe korisnika ali se tokom kolegija težilo njihovom ispunjavanju. Ulazno ograničenje pod c) je zakonska obveza i svi ju skuteri ispunjavaju. Ostala ulazna ograničenja mjerena su na prototipima ali se evaluacija prema njima ne vrši unutar metode koja je predložena u radu.

## **4.2 Generiranje inicijalnih matrica**

Prema prethodno definiranim potrebama korisnika i ograničenjima dobiveni su funkcijski zahtjevi na najvišoj razini (a zatim dekompozicijom i na nižim razinama) iz kojih je moguće opisati princip rada konceptualnog rješenja. Naime, skuter za mobilnost je prijevozno sredstvo kojim korisnik upravlja samostalno i ima zadatak prevesti korisnika od točke A do točke B, davajući pritom osjećaj sigurnosti. Uređaj treba moći podnijeti masu korisnika kao i mogućeg dodatnog tereta kojeg korisnik prevozi sa sobom. Mora se moći prilagoditi korisniku tako da

mu osigura udobnu vožnju, ali isto tako mora biti moguće sklapanje uređaja za olakšano prenošenje, odnosno prijevoz istog. Konstrukcijski problem koji je otežavao nezavisno ispunjavanje FR-a su komponente skutera koje osiguravaju nosivost u jednom načinu rada, a koje mora biti moguće sklopiti kako bi se omogućio drugi način rada.

U matrici konstruiranja na najvišoj razini hijerarhije povezani su DP-i koje u ovom slučaju predstavljaju podsustavi skutera sa pojedinim FR-ima na koje direktno odgovaraju [Tablica 2]. Zatim je provjerena sparenost DP-a na nižim razinama sa ostalim FR-ima na najvišoj razini te je matrica popunjena oznakama X ili 0. Analogno DP-ima na najvišoj razini, DP-e na nižim razinama predstavljaju podsklopovi odnosno dijelovi. Budući da je na najvišoj razini postignuta gornjotrokutasta forma, FR-i na nižim razinama moraju biti nespareni ili također djelomično spareni sa gornjotrokutastom formom. Pomični podsustavi i sustavi za pokretanje su spojevi među dijelovima temeljne konstrukcije, odnosno dijelovi vezani za temeljnu konstrukciju i kao takvi također moraju osigurati dovoljnu nosivost. Zbog navedene povezanosti u prvom redu matrice na 2. i 3. mjestu stavljena je oznaka X. Također je važno primijetiti da neke od komponenti za upravljanje (npr. ležaj kao konstrukcijski parametar u daljnjoj dekompoziciji) moraju omogućiti međusobno pomicanje dijelova.

**Tablica 2. Dekompozicija najviše razine hijerarhije**

INDEX	FR	DP
1	Osigurati nosivost	Temeljna konstrukcija
2	Omogućiti međusobno pomicanje dijelova	Pomični podsustavi
3	Osigurati protok energije za pokretanje	Sustav za pokretanje
4	Omogućiti upravljanje	Komponente za upravljanje

Iz navedenih FR-a i DP-a dobiva se djelomično sparena matrica konstruiranja koja glasi:

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & 0 \\ 0 & X & 0 & X \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dekompozicijom funkcijskog zahtjeva *osigurati nosivost* [Tablica 3] dobivena je gornjotrokutasta matrica krutosti. Može se primijetiti da se u dobivenoj matrici konstruiranja osim uobičajenih oznaka  $X$  i  $O$  javlja i oznaka  $x$ . Prema [18] ta oznaka ukazuje na nesparenu vezu prilikom konceptualizacije, ali je moguće da u drugim fazama neće biti zadovoljena. Ako je  $X \gg x$  može se pretpostaviti da je rješenje nespareno, ali se ne garantira zadovoljavanje aksioma nezavisnosti ako se konstrukcija promjeni. U ovom slučaju prigušujuća prednja vilica ovisno o rješenju nema utjecaj na krutost skutera.

**Tablica 3. Dekompozicija FR<sub>1</sub> Osigurati nosivost**

INDEX	FR	DP
11	Osigurati krutost konstrukcije	Okvir
12	Smanjiti utjecaj udara na prednji dio konstrukcije	Prigušujuća prednja vilica
13	Omogućiti pozicioniranje korisnika	Sjedalo
14	Osigurati korisnika od ispadanja	Oslonci
15	Omogućiti prijevoz dodatnog tereta	Odvojivi prostor za pohranu

$$\begin{bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{14} \\ FR_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & x & O & O & O \\ O & X & O & O & O \\ O & O & X & X & O \\ O & O & O & X & O \\ O & O & O & O & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{14} \\ DP_{15} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Oslonci koji primarno osiguravaju korisnika od ispadanja, ali pomažu i ispuniti funkcijski zahtjev *omogućiti pozicioniranje korisnika* jako su bitni za korisnikov osjećaj sigurnosti. Za to je ključno osigurati oslonac nogama, rukama i leđima [Tablica 4]. Dobivena matrica konstruiranja je nesparena, ali je potrebno primijetiti da su konstrukcijski parametri ručke i naslon sjedala. Samo sjedalo je parametar na višoj razini dekompozicije, te je prilikom generiranja ukupne matrice nužno pokazati njihovu povezanost.



**Tablica 4. Dekompozicija FR<sub>14</sub> Osigurati korisnika od ispadanja**

INDEX	FR	DP
141	Osigurati oslonac nogama	Stabilna podloga za noge
142	Osigurati oslonac rukama	Ručke sjedala
143	Osigurati oslonac leđima	Naslon sjedala

$$\begin{bmatrix} FR_{141} \\ FR_{142} \\ FR_{143} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{141} \\ DP_{142} \\ DP_{143} \end{bmatrix} \quad (13)$$

U slučaju dekompozicije FR-a *omogućiti međusobno pomicanje dijelova* dolazi se do funkcijskih zahtjeva koji se odnose na sklapanje ali i na mogućnost skutera da se prilagodi pojedinom korisniku [Tablica 5]. Ponekad je nužno pomicati komponente koje služe za prilagodbu korisniku kako bi se skuter mogao sklopiti. U dobrom rješenju prema principima Aksiomatskog konstruiranja to bi trebalo biti izbjegnuto. Budući da se radi o evaluaciji postojećih rješenja, neki od koncepata imaju riješeno sklapanje skutera na ovakav način pa je u matricu konstruiranja stavljena oznaka  $x$ . Matrica konstruiranja je gornjotrokutasta. Promjena položaja fiksirajućih komponenata je također nužna za proces sklapanja. Fiksirajuće komponente također mogu služiti za ograničenje pomaka komponenti koje služe za prilagodbu korisniku.

**Tablica 5. Dekompozicija FR<sub>2</sub> Omogućiti međusobno pomicanje dijelova**

INDEX	FR	DP
21	Omogućiti sklapanje	Mehanizmi za sklapanje
22	Omogućiti transport u sklopljenom položaju	Kotači
23	Prilagoditi prijevozno sredstvo korisniku	Pomične komponente
24	Osigurati sklopljen/rasklopljen položaj	Fiksirajuće komponente

$$\begin{bmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \\ FR_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & x & X \\ O & X & O & O \\ O & O & X & X \\ O & O & O & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \\ DP_{24} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Prilikom dekompozicije funkcije *omogućiti sklapanje* uključeni su FR-i koji postoje na konceptima kako bi se kasnije mogla provesti evaluacija [Tablica 6]. Što znači da u ovom slučaju dekompozicija ne sadrži najmanji mogući broj FR-a potrebnih da bi se izvršila funkcija višeg reda. Isto tako, dodavanje FR-a iz svih rješenja znači da neka rješenja neće imati ispunjene sve FR-e na ovoj razini. Iako je nezadovoljavanje funkcijskih zahtjeva općenito negativna pojava, u okviru evaluacije ovih rješenja staviti će se prioritet na ispunjavanje funkcije na višoj razini. Dobivena matrica konstruiranja je nesparena, budući da sklapanje pojedinih dijelova skutera omogućavaju sasvim drugi podsklopovi.

**Tablica 6. Dekompozicija FR<sub>21</sub> Omogućiti sklapanje**

INDEX	FR	DP
211	Omogućiti promjenu duljine konstrukcije	Klizni mehanizam 1
212	Omogućiti zakret nosača sjedala	Gornji i donji zglob na nosaču
213	Omogućiti prijelom upravljača	Zglob 1
214	Omogućiti prijelom konstrukcije	Zglob 2

$$\begin{bmatrix} FR_{211} \\ FR_{212} \\ FR_{213} \\ FR_{214} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O & O \\ O & X & O & O \\ O & O & X & O \\ O & O & O & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{211} \\ DP_{212} \\ DP_{213} \\ DP_{214} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Za dekompoziciju funkcije *prilagoditi prijevozno sredstvo korisniku* također su implementirana rješenja iz koncepta [Tablica 7]. Zakretanje upravljača mora nužno utjecati na visinu upravljača. Sparenost je moguće zaobići jedino ako se u rješenju implementira isključivo prilagodljiva visina, odnosno prilagodljiv kut. *Omogućiti zakretanje sjedala* odnosi se na omogućavanje rotiranja u horizontalnoj ravnini kako bi bilo olakšano sjedanje na skuter.

**Tablica 7. Dekompozicija FR<sub>23</sub> Prilagoditi prijevozno sredstvo korisniku**

INDEX	FR	DP
231	Prilagoditi visinu upravljača	Mehanizam za spuštanje/podizanje upravljača
232	Prilagoditi kut upravljača	Mehanizam zakretanja upravljača
233	Prilagoditi visinu sjedala	Mehanizam za spuštanje/podizanje sjedala
234	Omogućiti zakretanje sjedala	Mehanizam za zakretanje sjedala

$$\begin{bmatrix} FR_{231} \\ FR_{232} \\ FR_{233} \\ FR_{234} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{231} \\ DP_{232} \\ DP_{233} \\ DP_{234} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dekompozicijom funkcijskog zahtjeva *osigurati protok energije za pokretanje* dobivena je nesparena matrica konstruiranja [Tablica 8]. Konstrukcijski parametri ove razine dekompozicije spareni su na višoj razini kao što je prikazano u početnoj matrici.

**Tablica 8. Dekompozicija FR<sub>3</sub> Osigurati protok energije za pokretanje**

INDEX	FR	DP
31	Pogoniti prijevozno sredstvo	Električni pogon
32	Smanjiti utjecaj podloge	Kotači velikog promjera
33	Osigurati zaustavljanje	Kočnica s hidrauličkim diskom

$$\begin{bmatrix} FR_{31} \\ FR_{32} \\ FR_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{31} \\ DP_{32} \\ DP_{33} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Jedinu sparenost u dekompoziciji FR-a [Tablica 9] pogoniti prijevozno sredstvo predstavlja postojeći kontroler za ograničenje brzine. Prema zakonskoj regulativi, električni skuteri za mobilnost moraju imati ograničenu brzinu vožnje, a njegova ugradnja će svakako utjecati na ukupnu regulaciju pogona.

**Tablica 9. Dekompozicija FR<sub>31</sub> Pogoniti prijevozno sredstvo**

INDEX	FR	DP
311	Osigurati dovod električne energije	Li-ion baterije
312	Regulirati električni pogon	Kontroler
313	Ograničiti brzinu	Kontroler za ograničenje brzine
314	Omogućiti pretvorbu električne energije u mehaničku	Hub motor
315	Prenositi mehaničku energiju na kotače	Naplatak

$$\begin{bmatrix} FR_{311} \\ FR_{312} \\ FR_{313} \\ FR_{314} \\ FR_{315} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{311} \\ DP_{312} \\ DP_{313} \\ DP_{314} \\ DP_{315} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Funkcijski zahtjev *omogućiti upravljanje* odnosi se na samo skretanje vozila, ali i na olakšavanje vožnje skutera korisniku [Tablica 10]. Svijetla na skuteru su također dio zakonske regulative te ih svi koncepti sadržavaju. Drške skutera korisniku omogućavaju prihvata, ali se promjenom njihovog položaja mijenja smjer zbog čega se javlja sparenost u matrici konstruiranja.

**Tablica 10. Dekompozicija FR<sub>4</sub> Omogućiti upravljanje**

INDEX	FR	DP
41	Omogućiti korisniku uključivanje/isključivanje	Mehanička tipka
42	Osigurati vidljivost kontrola	Korisničko sučelje s velikim simbolima
43	Omogućiti reguliranje brzine	Ručica za gas
44	Omogućiti promjenu smjera	Ležaj
45	Omogućiti prihvata upravljača	Drške
46	Omogućiti korištenje u tami	Svjetla

$$\begin{bmatrix} FR_{41} \\ FR_{42} \\ FR_{43} \\ FR_{44} \\ FR_{45} \\ FR_{46} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O & O & O & O \\ O & X & O & O & O & O \\ O & O & X & O & O & O \\ O & O & O & X & X & O \\ O & O & O & O & X & O \\ O & O & O & O & O & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{41} \\ DP_{42} \\ DP_{43} \\ DP_{44} \\ DP_{45} \\ DP_{46} \end{bmatrix} \quad (19)$$

#### Evaluacija koncepata prema dobivenim matricama konstruiranja

U nastavku će se objasniti specifičnosti pojedinih koncepata skutera i opisati matrice konstruiranja za pojedine koncepte sa pojašnjenjima određenih sparenosti. Nijedan od skutera ne ispunjava sve funkcijske zahtjeve definirane inicijalnim matricama. Sjedalo je jednako na svim skuterima i sklapa se preklapanjem naslona prema naprijed.

##### 4.2.1 Opis koncepta 1 i pojašnjenje DM

Koncept 1 ima samo jedan položaja sjedala kada je skuter u rasklopljenom položaju. Jedini ima klizni mehanizam koji omogućava skraćivanje konstrukcije prilikom sklapanja skutera. Nema mogućnost promjene visine i nagiba upravljača, niti zakretanja sjedala. Moguće je prelomiti upravljač kada je skuter potrebno sklopiti. Ne ispunjava funkcijske zahtjeve *prilagoditi prijevozno sredstvo korisniku, omogućiti prijevoz dodatnog tereta i omogućiti prijelom konstrukcije* kao ni funkcijske zahtjeve koji proizlaze iz njih.



Slika 10. Skuter prema konceptu 1

Matrica konstruiranja je sparena [Slika 11]. Najveću sparenost uzrokuje prigušujuća prednja vilica jer je sparena sa FR-ima daleko od dijagonale, odnosno ona smanjuje utjecaj podloge (FR<sub>32</sub>) i omogućuje promjenu smjera (FR<sub>44</sub>). Osim prednje vilice kotači (FR<sub>22</sub>) također smanjuju utjecaj podloge. Li-ion baterije (DP<sub>311</sub>) potrebne su za napajanje svjetla koje omogućava korištenje u tami (FR<sub>46</sub>) kako u ovom tako i u svim drugim konceptima. Reguliranje brzine (FR<sub>43</sub>) omogućava kontroler (DP<sub>312</sub>). Kao što je prethodno navedeno sjedalo (DP<sub>13</sub>) osigurava oslonac leđima (FR<sub>143</sub>). Skuter prema konceptu 1 ne može se ni na koji način prilagoditi korisniku. Osim toga, nije omogućen prijevoz dodatnog tereta. Unatoč tome što nije omogućen prijelom konstrukcije, funkcijski zahtjev omogućiti sklapanje i dalje je u potpunosti ispunjen.

		DP																															
		1								2								3								4							
		1	2	3	4					1	2	3	2	4		1	2	3	4	5	2	3	1	2	3	4	5	6					
FR	1	1	X	X						X				X																			
		2		X									X						X		X												
		3			X	X	X	X																					X				
		4	1				X																							X			
			2					X																						X			
			3			x				X																							
	2	1								X					X																		
		2									X																						
		3										X																					
		4											X									X											
	3	1													X																		
		2														X	X										X						
		3															X																
		4																X															
		5																	X														
		6																			X												
	4	2			X									X									X										
		3																						X									
		1																						X									
		2																							X								
		3																								X							
		4			X																						X	X					
5																										X							
6																											X						

Slika 11. Konačna matrica konstruiranja koncepta 1

#### 4.2.2 Opis koncepta 2 i pojašnjenje DM

Na konceptu 2 visinu sjedala je moguće prilagoditi korisniku, ali se isti mehanizam koristi prilikom sklapanja. Također je moguće prilagoditi visinu upravljača, a konačni korak sklapanja predstavlja prijelom konstrukcije. Osim visine upravljača i sjedala, također je moguće zakrenuti sjedalo. Jedino ovaj koncept ispunjava ne-funkcijski zahtjev *omogućiti rastavljanja konstrukcije na 2 lakša dijela*. Ne ispunjava funkcijske zahtjeve *omogućiti promjenu duljine konstrukcije, omogućiti zakret nosača sjedala, omogućiti prijelom upravljača (podfunkcije) i prilagoditi kut upravljača*. Ali je jedini koncept koji omogućava pohranu dodatnog tereta.



**Slika 12. Skuter prema konceptu 2**

Matrica konstruiranja je sparena [Slika 13]. Osim sparenosti u donjem trokutu matrice koje su jednake kao u konceptu 1, javljaju se dodatne sparenosti. Prilikom sklapanja prijelomom konstrukcije (FR<sub>214</sub>), potrebno je također sklopiti i podloge za noge (DP<sub>141</sub>) na isti način. Zglob 2 (DP<sub>214</sub>) je sparen sa osiguravanjem sklopljenog/rasklopljenog položaja (FR<sub>24</sub>) jer se zglob osim fiksirajućim komponentama oblikom zadržava u potrebnom položaju. Mehanizam za spuštanje/ podizanje upravljača (DP<sub>231</sub>) omogućava prihvatanje upravljača (FR<sub>45</sub>), budući da u ne povoljnom položaju upravljača korisnik ne bi mogao pravilno upravljati. Koncept ne ispunjava sve navedene funkcijske zahtjeve za sklapanje i prilagodbu korisniku, ali su unatoč tome funkcijski zahtjevi više razine i dalje ispunjeni.

		DP																									
		1						2						3						4							
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
1	1	X	X									X															
	2												X														
	3													X													
	4														X												
	5															X											
2	1																										
	2																										
	3																										
	4																										
	5																										
3	1																										
	2																										
	3																										
	4																										
	5																										
4	1																										
	2																										
	3																										
	4																										
	5																										
FR																											

Slika 13. Konačna matrica konstruiranja koncepta 2



#### 4.2.3 Opis koncepta 3 i pojašnjenje DM

Skuter se sklapa tako što se sjedalo spusti u najniži položaj, preklopi se naslon sjedala i zatim se konstrukcija prelomi. Koncept 3 ispunjava najmanji broj funkcijskih zahtjeva postavljenih na rješenje. Funkcijski zahtjevi koje ne ispunjava su *prilagoditi prijevozno sredstvo korisniku, omogućiti prijevoz dodatnog tereta, omogućiti promjenu duljine konstrukcije* i *omogućiti prijelom upravljača* kao ni funkcijske zahtjeve koji proizlaze iz njih.



**Slika 14. Skuter prema konceptu 3**

Matrica konstruiranja je sparena [Slika 15]. Javljaju se jednake sparenosti u donjem trokutu matrice kao i u konceptu 1. Jedina razlika između ova 2 koncepta je u principima sklapanja. Budući da koncept 3 nema kliznog mehanizma za promjenu duljine konstrukcije, ne javlja se navedena sparenost.

		DP																					
		1					2					3					4						
1	1	1	2	3	4		5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
	2	X	X				X	X															
	3				X	X	X																
	4				X	X	X																
	5																						
2	1	1	2	3	4		5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
	2							X	X														
	3																						
	4																						
	5																						
3	1	1	2	3	4		5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
	2																						
	3																						
	4																						
	5																						
4	1	1	2	3	4		5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
	2																						
	3																						
	4																						
	5																						

**Slika 15. Konačna matrica konstruiranja koncepta 3**

#### 4.2.4 Opis koncepta 4 i pojašnjenje DM

Koncept 4 ima najveću prilagodljivost korisniku. Moguće je prilagoditi visinu sjedala, visinu upravljača, kut upravljača i moguće je sjedalo zakrenuti, odnosno osigurana je najveća prilagodljivost korisniku u odnosu na ostale koncepte. Skuter se sklapa tako što se prelomi sjedalo u gornjem i donjem zglobu, zatim se skрати i prelomi upravljač. Naposljetku se prelama sama konstrukcija. Ovo predstavlja najkompleksniji proces sklapanja od predloženih rješenja. Iako koncept nema prostor za pohranu dodatnog tereta, ukupni broj ispunjenih funkcijskih zahtjeva je najveći. Funkcijski zahtjevi koji nisu ispunjeni su *omogućiti prijevoz dodatnog tereta* i *omogućiti promjenu duljine konstrukcije*.



**Slika 16. Skuter prema konceptu 4**

Matrica konstruiranja je sparena. Osim sparenosti u donjem trokutu matrice koje su jednake kao u konceptu 1, javljaju se dodatne sparenosti. Naime, zglob koji omogućava prijelom upravljača (DP<sub>213</sub>) se koristi i za prilagodbu kuta upravljača (FR<sub>232</sub>), čime se automatski utječe i na visinu upravljača (FR<sub>231</sub>). Osim što prihvat upravljača (FR<sub>45</sub>) omogućuje mehanizam za spuštanje/podizanje upravljača (DP<sub>231</sub>), na njega utječe i mehanizam zakretanja upravljača (DP<sub>232</sub>). Za sklapanje nedostaje jedan funkcijski zahtjev, ali je funkcija na višoj razini u potpunosti ispunjena.

DP																															
1								2								3								4							
1				2				3				4				1				2				3				4			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
X	X						X								X																
	X							X																							
		X	X	X	X																										
				X																											

### 4.3 Evaluacija koncepata prema dobivenim matricama konstruiranja

Koncepti su usporedivi zato što su razvijani paralelno u timovima koji su imali jednaku dostupnost informacijama na tržištu i jednaka ograničenja na rješenje. Dodatno, dekompozicija je na svim skuterima izvršena do jednake razine. Kao što je prethodno navedeno nijedan skuter ne ispunjava sve funkcijske zahtjeve postavljene u inicijalnim matricama konstruiranja. Matrica konstruiranja je za pojedini koncept manja za onoliko redaka i stupaca koliko promatrani koncept ima neispunjenih funkcijskih zahtjeva. Prije nego što se provede evaluacija prema aksiomu nezavisnosti potrebno je usporediti valjanost koncepata u odnosu na ispunjenost FR-a. Kako bi se preglednije pokazalo koji FR-i nisu ispunjeni u kojem konceptu, napravljen je tablični prikaz [Tablica 11] u kojem je ispunjenost navedenog FR-a označena sa X, a neispunjenost sa 0.

**Tablica 11. Tablični prikaz neispunjenosti funkcijskih zahtjeva pojedinih koncepata**

Funkcijski zahtjev (FR)		Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Omogućiti prijevoz dodatnog tereta (FR <sub>15</sub> )		0	X	0	0
Omogućiti sklapanje (FR <sub>21</sub> )	Omogućiti promjenu duljine konstrukcije (FR <sub>211</sub> )	X	0	0	0
	Omogućiti zakret nosača sjedala (FR <sub>212</sub> )	X	0	X	X
	Omogućiti prijelom upravljača (FR <sub>213</sub> )	X	0	0	X
	Omogućiti prijelom konstrukcije (FR <sub>214</sub> )	0	X	X	X
Prilagoditi prijevozno sredstvo korisniku (FR <sub>23</sub> )	Prilagoditi visinu upravljača (FR <sub>231</sub> )	0	X	0	X
	Prilagoditi kut upravljača (FR <sub>232</sub> )	0	0	0	X
	Prilagoditi visinu sjedala (FR <sub>233</sub> )	0	X	0	X
	Omogućiti zakretanje sjedala (FR <sub>234</sub> )	0	X	0	X

Budući da koncept 4 ispunjava najveći broj funkcijskih zahtjeva njegova konačna matrica konstruiranja je najveća. Veća matrica ne znači nužno kompleksnije rješenje niti da je rješenje bolje od ostalih. Doduše, veličina matrice može ukazivati na to da je rješenje razrađenije jer ispunjava više funkcijskih zahtjeva. Svi koncepti imaju samo djelomično ispunjen funkcijski zahtjev *omogućiti sklapanje*, budući da se svi skuteri sklapaju na različit način, a inicijalna matrica sadrži sva rješenja. Potrebno je naglasiti da je sklapanje svih skutera moguće i da funkcijski zahtjevi na nižoj razini samo ukazuju na to što je sve potrebno učiniti kako bi se omogućilo sklapanje skutera. Odnosno, u ovom slučaju više funkcijskih zahtjeva korisniku predstavlja otežano korištenje. Koncept 4 jedini u potpunosti ispunjava zahtjev za prilagodbom prijevoznog sredstva korisniku zato što može prilagoditi i kut i visinu upravljača, ali koncept 2 jedini omogućava prijevoz dodatnog tereta i uz to djelomično omogućava prilagodbu korisniku. Koncept 4 ima jednostavnu prilagodbu visine sjedala, ali je proces sklapanja najkompleksniji. S druge strane, koncept 2 ima najjednostavniji proces sklapanja i jedini je koji se može rastaviti na dva dijela, što olakšava spremanje i prenošenje. Koncepti 1 i 3 se ne mogu uopće prilagoditi korisniku i prema tome predstavljaju slabija rješenja. Prednost koncepta 1 je to što jedini ima mogućnost produljivanja konstrukcije. Unatoč tome što su na konceptu zamišljena samo 2 položaja i koristi se za sklapanje, preinakom mehanizma mogla bi se postići prilagodljivost duljine konstrukcije potrebama korisnika. Koncept 3 je zbog svojeg oblika i dimenzija stabilan, te pruža dodatan osjećaj sigurnosti korisniku.

Usporedba je izvršena i prema broju zajedničkih i ukupnih elemenata u matricama. Ovime se teži dobiti uvid u to koliko su matrice koncepata sparene i pružaju li koncepti određena rješenja za izbjegavanje sparenosti koje se pojavljuju u drugim konceptima.

**Tablica 12. Broj zajedničkih elemenata između pojedinih koncepata**

	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Koncept 1		20	21	22
Koncept 2	20		21	29
Koncept 3	21	21		22
Koncept 4	22	29	22	
Ukupan broj nedijagonalnih elemenata	24	36	22	40

Iz tablice je vidljivo da koncept 3 ima najmanji broj nedijagonalnih elemenata, ali on također ispunjava najmanji broj funkcijskih zahtjeva. S druge strane, koncept 4 ima najviše nedijagonalnih elemenata, a ispunjava najviše FR-a. Budući da koncept 4 ima veliku prilagodljivost korisniku može se zaključiti da kod skutera veliki problem predstavlja pojava sparenosti između FR-a *omogućiti sklapanje i prilagoditi prijevozno sredstvo korisniku*. Prema principima Aksiomatskog konstruiranja dolazi se do zaključka da je prilikom konstruiranja skutera potrebno pokušati osigurati nezavisnost navedenih FR-a odnosno njima pripadajućih DP-a. Ali, metoda ne uzima u obzir koriste li se isti DP-i za različite FR-e istovremeno. Naime, skuter se najprije rasklapa pa zatim prilagođava korisniku. Budući da jedna radnja prethodi drugoj, korištenje jednakih komponenti za njihovo obavljanje trebala bi biti smatrana prednošću. Stoga je upitno može li se odnos između navedenih FR-a smatrati sparenim.

Također je vidljivo da svi koncepti imaju minimalno 20 zajedničkih nedijagonalnih elemenata [Tablica 12]. To znači da se u svim rješenjima javljaju gotove jednake sparenosti, odnosno jednaki konstrukcijski problemi. Unatoč tome, neki koncepti nude rješenja za sparenosti koje se pojavljuju u drugim konceptima. Tako, na primjer, kod koncepta 4 nije potrebno spustiti sjedalo u najniži položaj kako bi se sklopilo, pa je izbjegnuta sparenost između FR<sub>22</sub> i DP<sub>233</sub> koja se javlja na konceptu 2. Osim toga, kod koncepta 4 prijelom konstrukcije (FR<sub>214</sub>) ne ovisi o podlozi za noge (DP<sub>141</sub>) kao što je to slučaj kod koncepta 2 kod kojeg podloge za noge mogu smetati prilikom sklapanja. S druge strane, na konceptu 2 fiksirajuće komponente (DP<sub>24</sub>) nisu potrebne za zakretanje sjedala (FR<sub>234</sub>) kao u konceptu 4. Dodatno, u konceptu 1 zglobovi koji omogućavaju prijelom konstrukcije (DP<sub>214</sub>) pozicioniran je tako da ne utječe na krutost iste (FR<sub>11</sub>). Navedena bi rješenja za nesparenost bilo poželjno primijeniti na jednom konceptu jer bi se na taj način on poboljšao. Unatoč tome što koncept 4 ima najveću sparenost, on ispunjava najveći broj FR-a i nudi najviše rješenja za sparenost, te se može zaključiti da je on najviše razrađen.

Budući da nijedan od koncepata ne ispunjava sve funkcijske zahtjeve provedena je i analiza pomoću aksioma nezavisnosti. Usporedba koncepata provedena je izračunavanjem reangularnosti i semangularnosti prema jednadžbama (6) i (7) tako što su oznake  $X$  zamijenjene sa jedinicama, a  $x$  sa 0,1 zbog uvjeta  $x < X$  koji je pojašnjen ranije. Zbog preglednosti, navedene su usporedbe također prikazane tablično [Tablica 13].

**Tablica 13. Usporedba koncepata**

Kriterij	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Reangularnost (R)	0,3266	0,3952	0,3462	0,2933
Semangularnost (S)	0,001889	0,000564	0,003646	0,000344

Nakon što su izračunate vrijednosti reangularnost i semangularnost vidljivo je da nijedan od koncepata ne zadovoljava aksiom nezavisnosti, budući da bi za zadovoljavanje vrijednosti R i S trebale biti jednake. U idealnom rješenju, odnosno, u slučaju nesparene matrice R i S poprimaju vrijednosti jedan. Naime, Aksiomatsko konstruiranje ne daje smjernice za odabir rješenja koje ne odgovara navedenim uvjetima. Odnosno, nije pojašnjeno kako odrediti koje rješenje ima prednost pri odabiru za daljnju razradu ako nijedno od njih nije idealno, odnosno ne zadovoljava aksiom nezavisnosti. Ako bi se težilo postići idealno rješenje, onda bi se za razradu odabrao koncept 2 zbog najvećeg iznosa reangularnosti. Unatoč tome, vrijednost S-a je približno nula i gotovo jednaka kao i kod drugih koncepata zbog velikog broja nedijagonalnih elemenata koje bi trebalo ukloniti što znači da je idealno rješenje i dalje komplicirano postići. S druge strane, koncept 4 ima najmanju razliku između vrijednosti R i S, što znači da bi on bio dobar odabir za daljnju razradu ako bi se težilo djelomično sparenom rješenju. Kao i kod koncepta 2, problem ponovno predstavlja iznos semangularnosti. Uzevši u obzir sve navedene prednosti koncepta 4 može se reći da je on bolji od ostalih prema dosadašnjim kriterijima.

Budući da literatura zapravo ni na koji način ne usmjerava prema odabiru jednog od koncepata pomoću vrijednosti reangularnosti i semangularnosti u slučaju evaluacije koncepata koji ne zadovoljavaju prvi aksiom, u okviru ovog rada primijenit će se i drugi aksiom kako bi se koncepti dodatno vrednovali. Njegovom primjenom uzimaju se u obzir i ostale vrste informacije, a ne samo funkcijski zahtjevi. Pritom će se vrijednosti koje je tvrtka smatrala važnima i izmjerila na prototipima usporediti sa ograničenjima postavljenim na projektni zadatak na samom početku. Uz te vrijednosti usporedit će se i vrijeme sklapanja u odnosu na najmanje vrijeme sklapanja svih skutera. Količina informacija računat će se prema jednadžbi (9), odnosno (11) gdje će SR predstavljati postignuta vrijednost, a CR ciljana vrijednost. Ako je iznos određenog kriterija kod koncepta manja ili jednaka referentnoj, za količinu informacija se uzima da je jednaka nuli, budući da je kriteriji u potpunosti zadovoljen.



**Tablica 14. Evaluacija koncepata prema informacijskom aksiomu**

Kriterij	Referentna vrijednost	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Masa [kg]	$\leq 10$	26,1	23,1	26,3	24,5
Vrijeme sklapanja (s)	min = 13	20	13	27	40
Duljina [mm]	$\leq 900$	950	810	950	780
Visina [mm]	$\leq 700$	770	598	700	650
Širina [mm]	$\leq 400$	620	670	550	870
Ukupna količina informacija	-	2,853	1,952	2,987	4,035

Budući da je idealna količina informacija nekog sustava jednaka nuli, moguće je zaključiti da je koncept 2 prema drugom aksiomu najbolje rješenje. On ima najmanju masu najmanje vrijeme sklapanja i samo jednu gabaritnu dimenziju koja prelazi ciljanu vrijednost. S druge strane, koncept 4 koji je dosad pokazivao prednosti u odnosu na druge skutere zbog kompleksnosti ima veliko vrijeme sklapanja i nešto veću masu u odnosu na koncept 2.

## 5 DISKUSIJA

Različite metode evaluacije na drugačiji način pomažu u donošenju ispravne odluke. Odnosno, promatraju proces odlučivanja sa različitih aspekata i prema njima daju rezultate. Sam odabir metoda između mnoštva opcija predstavlja važnu odluku budući da drugačije metode daju različita rješenja [10]. Zbog toga je važno znati kakvi se rezultati mogu dobiti određenom metodom i prema tome pravilno odabrati metodu koja će se koristiti. Neke metode se međusobno upotpunjuju dok druge mogu davati proturječne rezultate. Većina metoda ocjenjivanja je jednostavna za korištenje i temelji se na intuiciji i iskustvu onih koji donose odluke. S druge strane, kod Aksiomatskog konstruiranja je zahtjevno formirati dobro rješenje pomoću matrice konstruiranja, ali pruža strukturiranu matematičku evaluaciju i na taj način uklanja eventualnu pristranost onih koji ocjenjuju. Prema [7] vrednovanje koncepata metodom težinskih faktora je jednostavnije i metodu je lakše prilagoditi promjenama u kasnijim fazama od Aksiomatskog konstruiranja. S druge strane, Aksiomatsko konstruiranje osigurava prilagodljivost same konstrukcije promjenama koje mogu nastati u kasnijim fazama. Odnosno, promjena jednog konstrukcijskog parametra neće utjecati na ispunjavanje ostalih funkcija proizvoda. Aksiomatsko konstruiranje može otkriti unutarnje tehničke konflikte i na taj način osigurati robusnost konstrukcije.

Unatoč tome što bi Aksiomatsko konstruiranje trebalo dati sistematizirani pristup rješavanju problema javljaju se određeni problemi tokom primjene. Naime, uobičajena procedura za evaluaciju pomoću aksiomatskih principa ne pojašnjava detaljno pojedine korake. Tako na primjer za dobivanje FR-a iz potreba korisnika, što predstavlja najvažniji korak u primjeni metode, ne postoje prave smjernice. Primjeri koji su ustaljeni u literaturi poput otvarača boca i limenki ili hladnjaka također sadrže loše definirane FR-e prema [27]. Nedovoljno definirani koraci imaju za posljedicu da konstruktori interpretiraju metodu na različite načine, pa se javljaju različite implementacije. Kod sustava oslobađanja padobrana aktiviranog toplinom prikazana je iteracija procesa povezivanja kako bi se smanjila sparenost FR-a [29], dok se primjena na električnom biciklu temeljila na pravilnom definiranju potreba korisnika iz kojih su direktno dobiveni FR-i [21], ali autor opisuje proces kao nejasan i kompliciran zbog velike količine prikupljenih podataka od korisnika. U radu u kojem se vrši evaluacija tarnih spojki, zanemareno je što koncepti ne zadovoljavaju prvi aksiom i uspoređeni su prema drugom aksiomu [12]. Prilikom evaluacije skutera također se javio sličan problem,

budući da nijedan od koncepata nije zadovoljio aksiom nezavisnosti. Aksiomatsko konstruiranje ne daje smjernice za odabir najboljeg među „lošim“ konceptima nego zahtijeva promjenu postojećih koncepata. Naime, iako je definirano kako se računaju reangularnost i semangularnost koji bi trebali biti pokazatelji ispravnosti rješenja, nije detaljno objašnjeno kako se njihove vrijednosti uspoređuju za više rješenja, ako ona nisu idealna. Odnosno metoda nema jasno definiranu proceduru za evaluaciju postojećih proizvoda kod kojih nije moguće utjecati na sparenost parametara. Kako bi se postigli rezultati bilo je nužno izmijeniti pristup. Naime, unatoč svim preporukama koje navodi dostupna literatura o aksiomatskim principima [16], prilikom evaluacije primijenjen je i drugi aksiom unatoč tome što prvi nije prethodno zadovoljen. U slučaju pojave sparenosti rješenja unutar metode nije definirano na koje načine je istu moguće smanjiti. Također, jedan od problema primjene Aksiomatskog konstruiranja u evaluaciji koncepata predstavlja složenost primjene metode u odnosu na ostale. Metoda zahtijeva veliku količinu informacija i mnogo iteracija kako bi se osiguralo pravilno definiranje FR-a. Unatoč tome, došavši do kraja istraživanja ustanovljeno je da bi neke FR-e trebalo zapisati drugačije. Glavni primjer je FR *omogućiti sklapanje* što predstavlja najbitniju funkciju skutera za mobilnost, a čija dekompozicija na nižim razinama predstavlja korisniku otežano korištenje. Drugim riječima, iako je FR dobiven direktno iz potreba korisnika, njegove niže razine su u direktnom sukobu sa ne-funkcijskim zahtjevima budući da oni nisu uključeni u dekompoziciju. Problem je u tome što Aksiomatsko konstruiranje ne daje smjernice za implementaciju ostalih vrsta zahtjeva i ograničenja za generiranje i evaluaciju rješenja [27]. Dodatno, drugi aksiom se vrlo rijetko implementira u praksi [28]. Nedostatak primjera primjene u literature čini njegovu implementaciju otežanom. Budući radovi trebali bi se više posvetiti prednostima drugog aksioma i njegovom primjenom unatoč kršenju prvog aksioma.

## 6 PRIJEDLOG POBOLJŠANJA

Nakon što su koncepti uspoređeni prema tri različita pristupa (zadovoljenje FR-a, aksiom nezavisnosti i informacijski aksiom) za ukupno najbolje rješenje odabran je koncept 2. Budući da koncept 2 ispunjava samo dva FR-a manje od koncepta 4, pri čemu jedini omogućava pohranu dodatnog tereta, ima najveći iznos za reangularnost i ima znatno manju količinu informacija u odnosu na ostale koncepte. U skladu sa predloženim pristupima za evaluaciju predložena su i poboljšanja kako bi se lakše pokazalo na koji način ona utječu na poboljšanje rješenja.

Kako bi se povećao broj zadovoljenih funkcijskih zahtjeva moguće je na rješenje dodati prijelom upravljača iz koncepta 4, budući da takav zglob omogućava postavljanje upravljača na više različitih kutova kako bi se skuter prilagodio korisniku. Implementacijom ovog zgloba mogla bi se smanjiti ukupna duljina konstrukcije, budući da je ona prilikom konstruiranja produžena kako bi fiksni kut upravljača odgovarao položaju korisnika dok upravlja vozilom.

Prilikom optimizacije zbog prvog aksioma potrebno je naglasiti da na određene sparenosti u matrici konstruiranja nije moguće utjecati promjenom pojedinih dijelova konstrukcije. Tako, na primjer, prednja vilica (DP<sub>12</sub>) mora nužno smanjiti utjecaj podloge kako bi se korisniku osigurala udobna vožnja (FR<sub>32</sub>). Kako bi se unatoč takvim sparenostima postigla djelomično sparena matrica, potrebno je promijeniti poredak stupaca (DP-a) i redaka (FR-a) u matrici. Ovaj postupak je iterativan i zahtjevan te u okviru rada nije do kraja proveden. Osim ovog postupka, na ispunjenje aksioma nezavisnosti utječe se i uklanjanjem sparenosti direktnom promjenom DP-a i FR-a. Jedna od takvih sparenosti u matrici konstruiranja na koje je moguće utjecati je sparenost između FR-a *omogućiti korištenje u tami* i DP-a *Li-ion baterije* koji spada u sustav za pokretanje. Naime, u trenutnoj izvedbi svjetlo se napaja iz istog izvora kao i motor koji pogoni skuter. Sparenost se može ukloniti tako da svjetlo ima vlastito napajanje. Osim što smanjuje sparenost ova promjena pojednostavljuje izvedbe i drugih dijelova konstrukcije jer nije potrebno predvidjeti prostor kojim bi prolazile žice za napajanje i na koji način će se one spajati sa baterijom. Također, baterije bi dulje napajale vozilo i pojednostavljena je elektronička shema. Specifičnu sparenost kod koncepta 2 predstavlja utjecaj podloge za noge na sklapanje. Ona se javlja zato što je na trenutnom rješenju potrebno sklopiti podloge za noge kako bi se konstrukcija mogla prelomiti. Sklopljene podloge za noge također oduzimaju dio dodatnog prostora za pohranu. Ako bi se prostor za pohranu skratio ne bi bilo potrebno prelomiti podlogu

za noge. Na ovaj način mogla bi se osigurati veća krutost podloga za noge, sklapanje bi bilo jednostavnije i uštedio bi se dostupan prostor za pohranu dok je skuter sklopljen unatoč tome što je ukupan prostor prethodno smanjen.

Kada bi se dodao zglobov za prijelom upravljača kao što je prethodno objašnjeno i konstrukcija bi se skratila, ograničenje duljine konstrukcije bi bilo bolje ispunjeno, ali bi se smanjila i masa koja predstavlja najvažnije ograničenje za industrijskog partnera. Također skraćivanje konstrukcije smanjilo bi i dimenzije sklopljene konstrukcije. Ako se konstrukcija izvede iz jednog dijela povećala bi se krutost nosive konstrukcije i postiglo bi se dodatno skraćivanje iste. Ovim postupkom ne bi se ispunio ne-funkcijski zahtjev *omogućiti rastavljanje*. Unatoč navedenim prednostima, ova radnja se ne preporuča budući da je korisnicima lakše rukovati s dva lakša dijela nego s jednim težim.

## 7 ZAKLJUČAK

Aksiomatsko konstruiranje je metoda koja pruža novi pristup konstruiranju skutera i bolje shvaćanje problema. Metoda dovodi do novih spoznaja, posebice kada su u pitanju izmijene koje je potrebno učiniti kako bi se rješenja poboljšala. Evaluacijom koncepata prema principima Aksiomatskog konstruiranja zaključeno je da nijedan od skutera ne ispunjava sve funkcijske zahtjeve i ne zadovoljava aksiom nezavisnosti. Također, ukazuje na to da je za dobivanje boljeg uvida u rješenja potrebno provesti dodatnu dekompoziciju funkcijskih zahtjeva koji predstavljaju važne aspekte pri korištenju skutera. Tokom pisanja rada istaknuti su problemi s primjenom aksiomatskih principa, ali je potrebno još jednom naglasiti da ne postoji točno definiran način formuliranja funkcijskih zahtjeva i ostalih vrsta informacija. Sam konstruktor mora metodom pokušaja i pogreške doći do zahtjeva koji pravilno odražavaju potrebe korisnika. Isto tako potrebno je tokom definiranja FR-a i DP-a imati na umu ne-funkcijske zahtjeve i ograničenja. Nedostatak Aksiomatskog konstruiranja je to što sama dekompozicija i analiza prema prvom aksiomu ne uzimaju u obzir ostale vrste informacija koje su definirane projektnim zadatkom. Zato je poželjno primijeniti drugi aksiom koji uspoređuje postignute vrijednosti sa ciljanima. Osim ovoga, jedna od prednosti Aksiomatskog konstruiranja je što ukazuje na to koji dijelovi uzrokuju sparenost, odnosno što je točno potrebno promijeniti kako bi konstrukcija bila bolja. Metoda također olakšava kombiniranje rješenja, što je česta pojava u praksi, jer je moguće direktno usporediti koji DP ne uzrokuje sparenost FR-a. Prema izmijenjenoj pristupu izvršena je evaluacija 4 koncepta skutera kako bi se odabrao najbolji. Unatoč tome što nijedno rješenje prema teoriji Aksiomatskog konstruiranja nije zadovoljilo i ima niske vrijednosti reangularnosti i semangularnosti za najbolje rješenje prema ispunjenosti FR-a i prvom aksiomu odabran je koncept 4 jer ispunjava najviše funkcijskih zahtjeva, predlaže rješenja za uklanjanje sparenosti i ima najmanju razliku između R-a i S-a. S druge strane, koncept 2 zbog najmanje količine informacije predstavlja najbolje rješenje prema drugom aksiomu iz čega je moguće zaključiti da je ponekad dobro implementirati drugi aksiom iako rješenja nisu ispunila prvi. Osim toga, primjenom drugog aksioma pokazano je da povećan broj funkcijskih zahtjeva utječe na kompleksnost rješenja i otežava korištenje što u ovom slučaju predstavlja problem za korisnika koji je ograničene pokretljivosti. Zbog boljeg ispunjenja drugog aksioma, najvećeg iznosa reangularnosti i samo 4 neispunjena FR-a koncept 2 odabran je za najbolje rješenje pa su za njega predložena poboljšanja.

## LITERATURA

- [1] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, *Engineering Design*, 3rd ed. Springer-Verlag, 2007.
- [2] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, "Product Design and Development," p. 415, 2012.
- [3] D. Marjanović, "Koncipiranje i kreativnost - podloge uz predavanja," pp. 1–35, 2016.
- [4] S. Tauhid and G. E. Okudan, "Fuzzy information axiom approach for design concept evaluation," *International Conference on Engineering Design, ICED'07 28 - 31 August 2007, Cite Des Sciences Et De L'industrie, Paris, France.*, no. August, pp. 1–12, 2007.
- [5] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [6] D. Marjanović, "Vrednovanje i odlučivanje - podloge uz predavanja," pp. 1–21, 2016.
- [7] A. Xiao, S. S. Park, and T. Freiheit, "A Comparison of Concept Selection in Concept Scoring and Axiomatic Design Methods," *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*, 2011.
- [8] A. Thakker, J. Jarvis, M. Buggy, and A. Sahed, "3DCAD conceptual design of the next-generation impulse turbine using the Pugh decision-matrix," *Materials and Design*, vol. 30, no. 7, pp. 2676–2684, 2009.
- [9] R. E. Breaz, O. Bologna, and S. G. Racz, "Selecting industrial robots for milling applications using AHP," *Procedia Computer Science*, vol. 122, pp. 346–353, 2017.
- [10] G. E. Okudan and S. Tauhid, "Concept selection methods - A literature review from 1980 to 2008," *International Journal of Design Engineering*, vol. 1, no. 3, p. 243, 2008.
- [11] I. B. Utne, "Improving the environmental performance of the fishing fleet by use of Quality Function Deployment (QFD)," *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, no. 8, pp. 724–731, 2009.
- [12] A. Girgenti, A. Giorgetti, C. Monti, and P. Citti, "Conceptual Design Evaluation of Different Friction Devices Through the Use of Axiomatic Design," in *Proceedings of ICAD2014, The Eighth International Conference on Axiomatic Design*, 2014.
- [13] M. Derelöv, *On Evaluation of Design Concepts*. Linköpings universitet, 2009.
- [14] B. El-Haik, *Axiomatic Quality: Integrating Axiomatic Design with Six-Sigma, Reliability, and Quality Engineering*. John Wiley & Sons, 2005.
- [15] N. P. Suh, *Complexity: Theory and Application*. Oxford University Press, 2005.
- [16] A. M. Farid and N. P. Suh, *Axiomatic Design in Large Systems*. Springer, 2016.

- 
- [17] D. Silverstein, P. Samuel, and N. Decarlo, *Axiomatic Design*, vol. 1. 2011.
- [18] G.-J. Park, *Analytic Methods for Design Practice*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [19] M. Nordlund, S. Kim, and T. Lee, “Axiomatic Design: 30 Years Later,” in *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2015.
- [20] C. A. Brown and R. Henley, *Metrics for Developing Functional Requirements and Selecting Design Parameters in Axiomatic Design*, vol. 53. 2016.
- [21] A. Kreuzer, B. Nitsche, and J. Kantola, “Application of Axiomatic Design to Electric Bicycles,” in *The Eighth International Conference on Axiomatic Design*, 2014.
- [22] A. Girgenti, A. Giorgetti, P. Citti, and M. Romanelli, “Development of a Custom Software for Processing the Stress Corrosion Experimental Data through Axiomatic Design,” in *Proceedings of ICAD2015, The 9th International Conference on Axiomatic Design*, 2015, vol. 34, pp. 250–255.
- [23] M. Ouellet and A. Vadean, “Design Improvement of Hybrid Composite Joints by Axiomatic Design,” in *Proceedings of the 7th International Conference on Axiomatic Design*, 2013, pp. 21–27.
- [24] R. Henley and C. A. Brown, “Axiomatic Design Applied to Play Calling in American Football,” *Procedia CIRP*, vol. 53, pp. 206–212, 2016.
- [25] C. A. Brown, *Decomposition and prioritization in engineering design*. 2011.
- [26] Y. Borgianni and D. T. Matt, *Ideality in Axiomatic Design and beyond*, vol. 53. 2016.
- [27] M. K. Thompson, *A Classification of Procedural Errors in the Definition of Functional Requirements in Axiomatic Design Theory*. 2013.
- [28] O. Kulak, S. Cebi, and C. Kahraman, “Applications of axiomatic design principles: A literature review,” *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 9, pp. 6705–6717, 2010.
- [29] G. Bragason, S. Porsteinsson, R. I. Karlsson, N. Grosse, and J. T. Foley, “Heat-activated Parachute Release System,” *Proceedings of the 9th International Conference on Axiomatic Design*, vol. 34, pp. 131–136, 2015.



## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**